



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ATENUAÇÃO DO *ground-roll* UTILIZANDO A  
FILTRAGEM DIRECIONAL RADIAL

ANDERSON SILVA SANTOS

SALVADOR – BAHIA

JULHO – 2014

**Atenuação do *ground-roll* utilizando a filtragem direcional radial**

por

ANDERSON SILVA SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

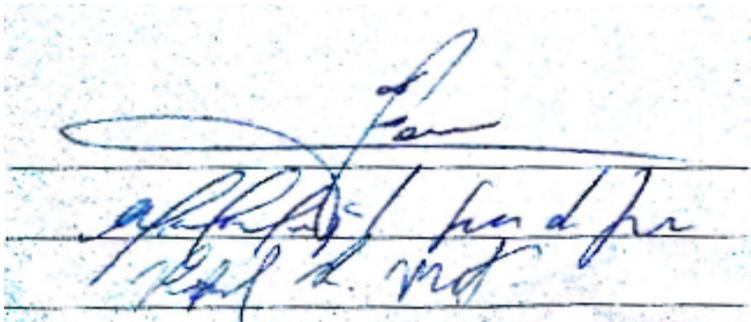
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

The image shows a document with three horizontal lines. Above the top line is a large, stylized signature. Below the top line, between the middle and bottom lines, are three smaller signatures. The document appears to be a list of names for the exam committee.

Comissão Examinadora

Dr. Milton José Porsani

MSc. Michelângelo Gomes da Silva

BSc. Rafael Rodrigues Manenti

Data da aprovação: 30/07/2014

Dedico aos meus pais, Carmilton e Iracema. Dedico também a minha avó Dona Carmita, a quem considero como uma mãe e finalmente dedico esse trabalho a minha amada esposa, Carmen.

# RESUMO

Um dos grandes problemas do processamento de dados sísmicos terrestres é o ruído coerente *ground-roll*. Este ruído é gerado devido a fonte durante os processos de aquisição e está associado com a propagação de ondas superficiais do tipo *Rayleigh*, que possui baixa frequência, altas amplitudes e baixa velocidade. Os métodos de filtragem normalmente usados para atenuar este ruído trabalham nos domínios da frequência 1D e 2D, rejeitando parte do espectro associado com o ruído. A rejeição cirurgica também afeta a banda do sinal e acaba reduzindo a razão sinal/ruído.

O presente trabalho apresenta um novo método para filtrar o *ground-roll*, chamado Filtragem Direcional Radial (FDR). O método explora as características linear e radial do *ground-roll* e é apropriado para ser aplicado diretamente nos painéis de sismogramas no domínio do tiro comum.

Os efeitos do novo método é testado no processamento da linha sísmica terrestre da Bacia do Tacutu. Em cada ponto do painel de traços, a saída do FDR é a predição ou as derivadas do sismograma ao longo da inclinação do *ground-roll*.

Os resultados do método FDR são comparados com os métodos no domínio da frequência 1D e 2D, mostrando que a nova abordagem é mais eficiente em atenuar o *ground-roll* e em aumentar a coerência na análise de velocidades. Em conjunto com o método FDR, nós também aplicamos a deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson (DAWL). Em comparação com os métodos de filtragem convencionais, o método FDR provou ser mais efetivo, melhorando a análise de velocidades por eliminar o ruído coerente, gerando seções empilhadas com uma alta resolução temporal. Em adição, o método DAWL forneceu uma seção com alta razão sinal/ruído.

# ABSTRACT

One of the major problems of the processing of land seismic data is the ground-roll noise. This noise is generated by the source during the acquisition process and is associated with the propagation of Rayleigh type surface waves, which have low frequency, high amplitudes and low velocity. The filtering methods normally used to attenuate this noise work in the 1D and 2D frequency domains, by rejecting part of spectra associated with the noise. The surgical rejection also affects the band of the signal and ends up reducing the signal/noise ratio.

This paper presents a new method to filter the ground-roll, named Radial Directional Filtering (RDF). The method explores the linear and radial characteristics of the ground-roll and is appropriated to be directly applied to seismogram panels in the common shot domain.

The effectiveness of the new method is tested in the processing of a land seismic line of the Tacutu Basin. In each data point of the panel of traces, the output of the RDF is the prediction or the derivatives of the seismogram along the slope of the ground-roll.

The results of the RDF method are compared with conventional 1D and 2D frequency domain methods showing that the new approach is more effective in attenuating the ground-roll and in improving coherence in the velocity analysis. In conjunction with the RDF method, we also apply the adaptive Wiener-Levinson deconvolution (AWLD). In comparison with traditional filtering methods, the RDF method proved to be quite effective, improving the velocity analysis by eliminating coherent noise generating stacked sections with a higher temporal resolution. In addition, the AWLD method provided a section with high signal/noise ratio.

# ÍNDICE

RESUMO . . . . .	iii
ABSTRACT . . . . .	iv
ÍNDICE . . . . .	v
ÍNDICE DE FIGURAS . . . . .	vii
INTRODUÇÃO . . . . .	1
<b>CAPÍTULO 1 O processamento sísmico . . . . .</b>	<b>3</b>
1.0.1 O fluxograma de processamento . . . . .	3
1.1 Pré-processamento . . . . .	4
1.1.1 Geometria . . . . .	4
1.1.2 Edição e mute . . . . .	6
1.2 Processamento avançado . . . . .	7
1.2.1 Filtragem . . . . .	7
1.2.2 Análise de velocidades . . . . .	9
1.2.3 Correção de NMO . . . . .	10
1.2.4 Empilhamento . . . . .	10
<b>CAPÍTULO 2 Os métodos de filtragem . . . . .</b>	<b>11</b>
2.0.5 Passa-Banda . . . . .	11
2.0.6 A filtragem F-K . . . . .	13
2.0.7 Deconvolução . . . . .	15
2.0.8 A deconvolução de Wiener-Levinson . . . . .	16
2.0.9 A deconvolução preditiva de Wiener-Levinson (L=1) . . . . .	17
2.0.10 A deconvolução preditiva adaptativa . . . . .	19
<b>CAPÍTULO 3 A filtragem direcional radial . . . . .</b>	<b>21</b>
3.0.11 O operador de derivada . . . . .	21
3.0.12 A escolha do foco . . . . .	23
3.0.13 A distância de predição e as altas frequências . . . . .	24

<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Resultados</b>	26
4.0.14	Fluxograma adotado	26
4.0.15	Filtragem dos dados	27
4.0.16	Influência na análise de velocidades	33
4.0.17	Seções empilhadas	35
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Conclusão</b>	42
<b>Agradecimentos</b>		43
<b>Referências Bibliográficas</b>		44

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Parâmetros da geometria . . . . .	5
1.2	Aplicação da função mute. . . . .	7
1.3	Movimento de propagação da onda Rayleigh. . . . .	8
1.4	Shot-gather contaminado com o ground-rol. . . . .	9
2.1	Filtro de frequências do tipo trapezoidal passa-banda. . . . .	12
2.2	Representação dos eventos no domínio do tiro e fk respectivamente. . . . .	14
2.3	Fluxograma para o filtro f-k . . . . .	15
2.4	Representação da deconvolução adaptativa com um traço de 20 amostras e janela de 7 coeficientes. Para cada tempo, a amostra filtrada final é a média das amostras filtradas, naquele tempo, dentro da janela deslizante. . . . .	20
3.1	Operador de derivada . . . . .	22
3.2	Comparando as diferentes distâncias de predição. . . . .	25
4.1	Fluxograma de processamento adotado . . . . .	27
4.2	Espectros de amplitudes dos tiros original e filtrado. . . . .	28
4.3	Tiro no domínio Fk antes e após a filtragem. . . . .	29
4.4	Espectros de amplitudes comparando as filtragens. . . . .	30
4.5	Espectros de amplitudes comparando as filtragens FK e FDR. . . . .	31
4.6	Resultado da aplicação dos filtros. . . . .	32
4.7	Semblance do CDP 176 sem filtros . . . . .	33
4.8	Semblance do CDP 176 após a filtragem FK . . . . .	34
4.9	Semblance do CDP 176 após a filtragem FDR . . . . .	34
4.10	Seção original sem aplicação de filtros. . . . .	37
4.11	Seção após o filtro PB. . . . .	38
4.12	Seção após o filtro FK. . . . .	39
4.13	Seção após o filtro FDR com ponto de predição fora do operador. . . . .	40
4.14	Seção com FDR + DAWL com filtro de 7 coeficientes. . . . .	41

# INTRODUÇÃO

O ruído coerente *ground-roll* se mostra um problema quando o assunto é o processamento sísmico de linhas sísmicas terrestres. O *ground-roll* está associado a propagação de ondas superficiais do tipo *Rayleigh*. Esse ruído aparece em uma seção de tiro comum como um cone de baixas frequências e altas amplitudes e por ser um evento altamente energético acaba mascarando as reflexões, diminuindo significativamente a razão sinal/ruído do dado.

É neste contexto que o LAGEP-UFBA apresenta um novo método de filtragem de eventos lineares em dados sísmicos de reflexão que é a filtragem direcional radial (FDR) (Santos, 2013; Porsani, 2013). Este novo método de filtragem é uma nova abordagem para o filtro de derivada 2D proposto por Mello & Porsani (2008), e cuja aplicação convencional consistia além da convolução do operador de derivada com o sismograma, a aplicação da derivada direcional no domínio radial (Mello, 2008 & Manenti, 2013; Porsani, 2013). A transformada radial (TR) levava os dados do domínio x-t para o domínio R-T ou V-T, em seguida era realizada a derivada direcional na direção vertical, onde se encontrava o ruído coerente, por fim era efetuada a transformada radial inversa (Manenti, 2013). O método FDR efetua localmente, em cada ponto da malha, tomando um foco como referência à derivada direcional, evitando os ruídos numéricos do método TR que ocorrem devidos à reamostragem dos dados.

No presente trabalho, realizamos o processamento CMP de dados sísmicos 2D, adquiridos na Bacia do Tacutu, pela PETROBRAS no ano de 1981 e que foi obtido junto à ANP pelo CPGG-UFBA (Silva, 2004). Algumas etapas do processamento sísmico são muito sensíveis à presença de ruídos nos dados, tais como a deconvolução e a análise de velocidades, sendo assim, decidimos verificar o efeito do filtro FDR nessas etapas do processamento em comparação com os filtros passa-banda (PB) e frequência/número de onda (FK).

Os filtros de frequências 1D e 2D são muito usados na indústria com o objetivo de se atenuar o *ground-roll*, porém esses métodos apresentam uma desvantagem quando o assunto é preservar bandas do sinal sísmico, pois ao se definir zonas de corte nos domínios da frequência ou frequência/número de onda e ao se rejeitar a faixa que se encontra o ruído, parte do sinal também é rejeitado. O filtro FDR neste aspecto se mostra superior aos métodos convencionais, pois esse não utiliza mais o conceito de corte, mas leva em conta a coerência e a natureza linear do ruído em uma seção de tiro comum para a atenuação.

Uma vez atenuado o ruído coerente que prejudicava a razão sinal/ruído nos dados sísmicos, optou-se por verificar o efeito da deconvolução nos dados, visto que com a atenuação do

ruído seria de esperar resultados bastante satisfatórios. E o que fora observado foi justamente isso, ao se aplicar a deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson, tanto para comprimir o pulso em um impulso como para atenuar o evento coerente em conjunto com o filtro FDR, o resultado foi uma seção empilhada com ótima resolução temporal.

Optou-se por usar uma plataforma de processamento sísmico desenvolvida dentro de um dos projetos do INCT-GP que contou com a participação da UFBA, UNICAMP, UFPA e outras instituições de ensino e pesquisa. O objetivo é mostrar que esta plataforma apesar de se encontrar em fase de desenvolvimento avançado, aparece como uma poderosa interface para o ensino e para confecção de seções sísmicas de qualidade. A GêBr é uma interface amigável que tem como objetivo fornecer ao usuário a facilidade de processamento que os softwares comerciais apresentam. Possui o pacote livre de processamento Seismic Unix(SU) como código para processamento sísmico o que não isenta do usuário conhecimento prévio do SU (Bilot, 2013). O SU fora desenvolvido e possui livre distribuição pelo *Center for wave Phenomena(CWP) da School of Mines, Colorado*.

Esta plataforma permite a inserção de módulos externos que pode ser desde um programa que realiza a filtragem até ao que realize a migração do dado sísmico com um novo método desenvolvido na academia ou na indústria, o que faz dessa plataforma uma excelente oportunidade de mostrar o que é desenvolvido nas instituições de ensino. O filtro FDR, assim como a deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson (DAWL) foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação FORTRAN.

# CAPÍTULO 1

## O processamento sísmico

O processamento de dados sísmicos de reflexão consiste basicamente no tratamento do sinal sísmico utilizando algoritmos matemáticos com o objetivo de atenuar ruídos, aumentando assim a razão sinal/ruído e mapear as verdadeiras posições das estruturas geológicas abaixo do solo, através do processo conhecido como migração, que não é o objetivo desse trabalho. Pode ser dividido em duas etapas: o pré-processamento e o processamento avançado; na primeira é realizado a preparação do dado enquanto que na segunda é utilizado técnicas e algoritmos mais complexos com o objetivo de obter uma imagem com a maior resolução possível. Todas as etapas que são realizadas dentro do processamento compõem o que chamamos de fluxograma de processamento.

A quantidade de etapas dentro do fluxograma de processamento irá depender dentre muitos fatores, da qualidade do dado, dos objetivos do geofísico e também dos recursos disponíveis no software utilizado (Silva, 2004). A seção sísmica empilhada irá mostrar o quão bom fora o processamento realizado pelo geofísico, sendo que alterações no sinal sísmico e a criação de artefatos numéricos devem ser evitados. Vale ressaltar que na etapa do processamento sísmico, o geofísico não irá "criar dados", o que torna indispensável todo o cuidado durante a etapa de aquisição de dados, pois uma vez não adquirido os dados com as informações desejadas, pouca coisa poderá ser feita durante a etapa de processamento.

### 1.0.1 O fluxograma de processamento

O fluxograma de processamento adotado pelo geofísico irá depender das suas necessidades e dos recursos disponíveis nos softwares de processamento, mas basicamente ele consistirá nas seguintes etapas básicas que são:

<b>Fluxograma básico de processamento</b>	
<b>Pré-processamento</b>	<b>Processamento avançado</b>
Leitura dos dados	Filtragem
Geometria	Deconvolução
Correção de amplitude	Análise de velocidades
Edição	Correção NMO
Mute	Empilhamento

Uma importante etapa do processamento sísmico não abordada no fluxograma acima é a migração; que dentro do fluxograma de processamento pode aparecer tanto pré-empilhamento ou pós-empilhamento, cada qual com as suas vantagens e desvantagens, sendo que a pré-empilhamento apesar do relativo custo computacional apresenta melhores resultados (Silva, 2004). Mas como o objetivo é testar os métodos de filtragem de dados sísmicos de reflexão, não realizaremos a migração dos dados.

As etapas de processamento sísmico são abordadas no presente trabalho com relativa simplicidade, visto que o objetivo conforme já destacado é a apresentação do novo método de filtragem.

## 1.1 Pré-processamento

O pré-processamento é uma etapa de fundamental importância visto que qualquer erro cometido nesta etapa pode comprometer seriamente todo o trabalho, exigindo do geofísico bastante atenção e cuidado.

### 1.1.1 Geometria

Nesta etapa é necessário que se forneça informações tais como: coordenadas das fontes, receptores, offsets, cdps e outros parâmetros que serão de fundamental importância durante a etapa de tratamento do sinal sísmico, visto que os algoritmos usados nessa etapa, seja da filtragem a migração, utilizam as informações contidas no *header*. Os parâmetros do *header* devem representar a situação real durante a aquisição.

Afim de auxiliar o trabalho do geofísico no processamento, após a aquisição é fornecido um relatório de campo que dentre as muitas informações contém:

- Número de tiros.
- Tiros de teste.
- Quantidade de receptores.

- Distância entre tiros.
- Distância entre receptores.

Informações como afastamento fonte/receptor (*offset*) e cdp que é o ponto comum em profundidade (Vale lembrar que o CMP (Common Midpoint) e o CDP (Common Depth Point) são assumidos iguais para camadas planas horizontais) respectivamente, são fornecidas durante a etapa de geometria. Essa fase do processamento geralmente é vista com certa dificuldade nos estágios iniciais de aprendizagem, mas a geometria realizada dentro da plataforma GêBr facilita bastante esta etapa.

Pode-se esquematizar as principais informações fornecidas durante a geometria com a Figura 1.1.

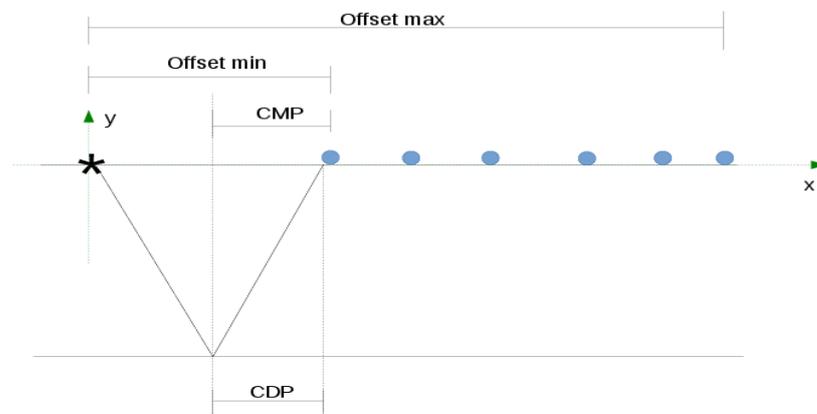


Figura 1.1: Parâmetros da geometria

Após terminada a geometria utilizando a plataforma GêBr, se espera encontrar as seguinte chaves do *header* com os seus respectivos valores.

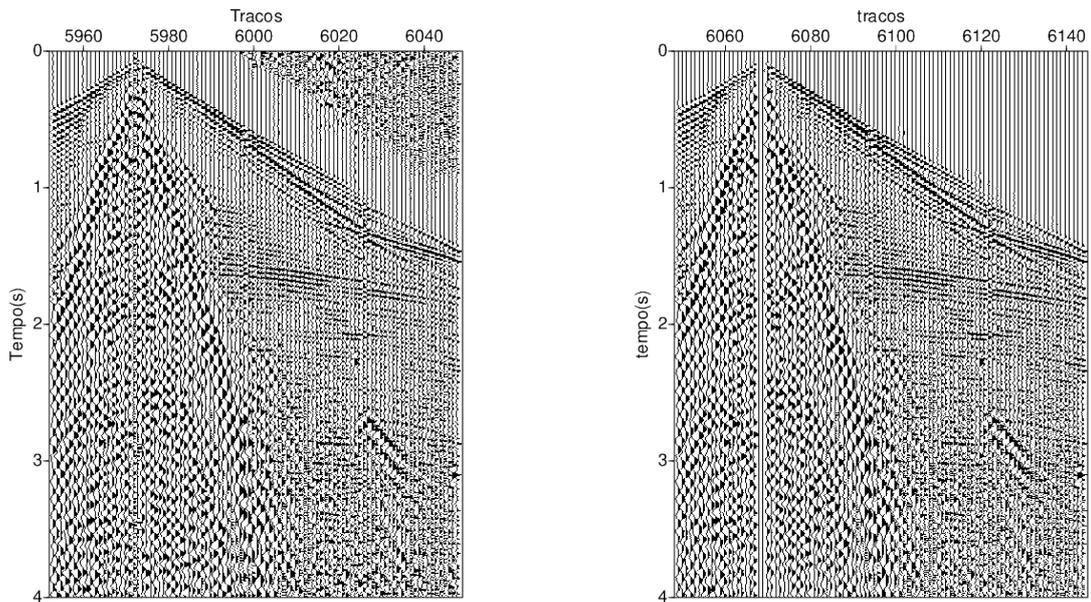
- **tracl**: informa uma sequência numérica dos traços.
- **tracr**: informa uma sequência numérica dos traços.
- **fldr**: indica o número de sismogramas/número de registros/número de tiros.
- **cdp**: informa a coordenada de cada cdp ou o número do cdp.
- **offset**: informa os afastamentos do par fonte/receptor.

- **sx/sy**: coordenada (x,y) de cada ponto de tiro.
- **gx/gy**: coordenada (x,y) de cada receptor.
- **ns**: número de amostras.
- **dt**: intervalo de amostragem.

### 1.1.2 Edição e mute

Nesta etapa do processamento procura-se na medida do possível eliminar os tiros e traços ruidosos que podem comprometer a razão sinal/ruído na seção sísmica empilhada. Na etapa conhecida como edição, o geofísico irá procurar por traços nulos ou altamente poluídos com ruídos de altas ou baixas frequências provenientes do ambiente ou simplesmente por mau funcionamento dos receptores durante a aquisição. Muitas vezes a eliminação de uma parte da família de tiro comum é necessária, outras vezes a eliminação de todo esta não pode ser evitada devido ao alto grau de contaminação. Essa etapa do processamento exige experiência do geofísico, pois muitas vezes, apesar de muito ruidoso, as famílias de tiro comum podem apresentar reflexões e nesse caso talvez seja melhor não eliminar essa parte do dado e sim mais tarde no processo de filtragem ou até mesmo durante o empilhamento, tentar atenuar o ruído presente no sismograma.

O processo de *mute* envolve em se definir uma *função mute* acima do tempo que se admite registro de sinal e eliminar essa região, pois atribui-se a essa região ruidosa a ruídos ambientais ou ao mau funcionamento dos receptores, neste caso geofones. Notar na seção de tiro comum da Figura 1.2a a presença de ruídos antes do tempo de registro nos receptores, provavelmente devido a ruídos ambientais.



(a) Sismograma Original.

(b) Sismograma após aplicação da função mute.

Figura 1.2: Aplicação da função mute.

## 1.2 Processamento avançado

No processamento avançado começa a etapa de imageamento, onde através de algoritmos e técnicas sofisticadas procura-se apresentar uma imagem que mais represente as estruturas geológicas em subsuperfície.

### 1.2.1 Filtragem

A filtragem de dados sísmicos de reflexão consiste em se atenuar todos os eventos indesejáveis presente nos dados. Se a filtragem for eficiente o resultado será um aumento significativo da razão sinal/ruído, proporcionando uma seção empilhada de ótima qualidade. São muitos os métodos de filtragem com aplicação em dados sísmicos, mas em geral exige conhecimento acerca do ruído de que se deseja atenuar. Como exemplo temos os filtros de frequências 1D e 2D que são muito empregados na atenuação de ruídos de altas e baixas frequências.

Uma das grandes preocupações ao se processar dados de sísmica de reflexão em bacias terrestres é a presença do ruído coerente *ground-roll*. Este ruído está diretamente relacionado com a propagação de ondas superficiais do tipo *Rayleigh* (Figura 1.3), possuindo como características baixas frequências e altas amplitudes, o que o torna bastante indesejável na seção

sísmica final, onde por ser bastante energético acaba mascarando as reflexões e por fim os refletores. Os dados de sísmica de reflexão da Bacia do Tacutu além de possuir uma baixa cobertura, apresenta uma alta concentração do ruído coerente *ground-roll* o que torna-se um desafio obter seções sísmicas com alta resolução nessa bacia.

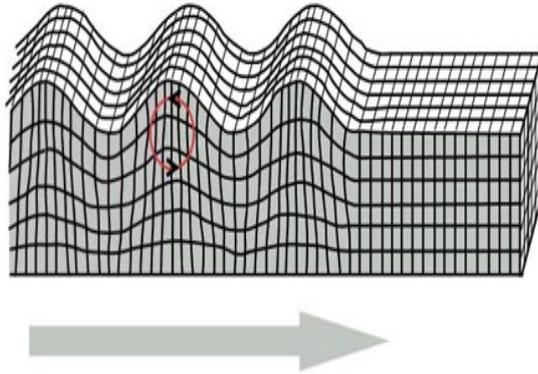


Figura 1.3: Movimento de propagação da onda Rayleigh.

Na medida que se propaga para o interior da terra a onda sísmica sofre uma atenuação de  $\frac{1}{r^2}$  enquanto que o *ground-roll* sofre uma atenuação na razão de  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  (Yilmaz, 2001), sendo assim é fácil de ver o porquê da contaminação devido ao *ground-roll* mesmo nos tempos mais tardios. Na Figura 1.4 podemos ver o efeito do *ground-roll* em uma seção de tiro comum. O *ground-roll* aparece no registro sísmico como um cone de altas amplitudes e baixas frequências, mascarando as reflexões e esse efeito acaba prejudicando na etapa de *análise de velocidades* e além de diminuir significativamente a razão sinal/ruído na seção sísmica empilhada.

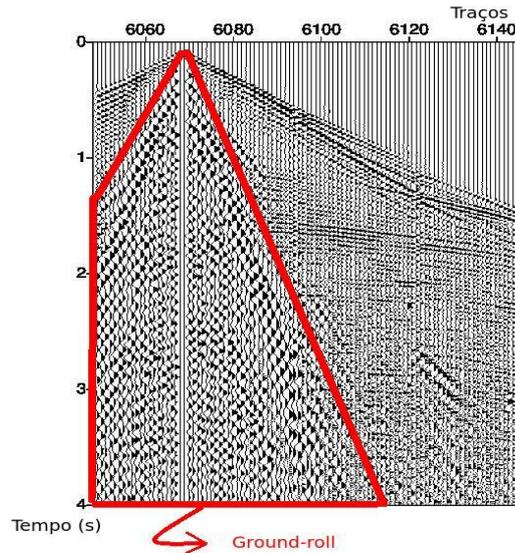


Figura 1.4: Shot-gather contaminado com o ground-roll.

Como trabalha-se no processamento sísmico em geral com um grande número de seções de tiro comum é necessário que seja separado uma seção de tiro comum ou até mesmo um pequeno conjunto desses afim de testar os métodos de filtragens pretendidos. A seção escolhida deve apresentar um comportamento geral médio dos tiros e deve possuir o ruído bem evidente assim como reflexões com o objetivo de se testar a eficácia dos filtros e após satisfeito com os resultados, o geofísico irá estender a filtragem para todo o resto dos dados, evitando assim a perda de dados devido a filtragens não satisfatórias e economia no tempo de processamento.

### 1.2.2 Análise de velocidades

Sem sombra de dúvidas essa é uma das etapas mais importante do processamento sísmico. É nessa etapa que procurara-se estimar as velocidades das camadas em subsuperfície, que serão de fundamental importância para as etapas subsequentes, como *correção de NMO*, *empilhamento* e *migração*. Mas a *semblance* que é gerada para o cálculo da análise de velocidades leva em conta a coerência dos eventos na seção e a presença de ruídos coerentes podem proporcionar a existência de falsos positivos na etapa dos picks de velocidades.

Com isso em mente fora gerado painéis de *semblance* com o objetivo de verificar a eficácia dos métodos de filtragem na eliminação de falsos positivos e no aumento da razão sinal/ruído. Mas antes foi necessário se elaborar *supergathers* visto que a cobertura CMP da linha sísmica da Bacia do Tacutu era relativamente baixa, e isso fora feito com o auxílio de *shells scripts*.

### 1.2.3 Correção de NMO

Se tomarmos um modelo de uma terra com camadas plano-paralelas, ao reorganizarmos o tiro em famílias CMP, teremos uma representação de traços que correspondem a eventos em superfície e que possuem um ponto comum em profundidade. Se partirmos de um modelo de uma camada plana e horizontal temos que o tempo de trânsito para essa reflexão será dado por:

$$t = \sqrt{\left(\frac{2h}{v}\right)^2 + \left(\frac{x}{v}\right)^2} = \sqrt{t_0^2 + \left(\frac{x}{v}\right)^2} \quad (1.1)$$

Onde  $t_0$  é tempo de trânsito da reflexão de incidência normal. O que se chama de *normal moveout* é a diferença entre o tempo de trânsito de reflexão da onda a um dado afastamento  $x$  e o tempo de trânsito para o afastamento nulo, com incidência normal (Yilmaz, 2000):

$$\Delta t = \sqrt{t_0^2 + \left(\frac{x}{v}\right)^2} - t_0 \quad (1.2)$$

A teoria envolvida tanto na correção NMO como nas outras etapas do processamento sísmico poderiam ser abordadas de forma mais complexas, mas isso fugiria do objetivo do trabalho, que é a apresentação do novo método de filtragem, o filtro FDR.

Após feita a análise de velocidades obteve-se um conjunto de pares  $V_{nmo}$  x  $T_{nmo}$  que foram usados para efetuar a correção de *normal moveout*, lembrando que como o objetivo era comparar os métodos de filtragem, fora usada a mesma velocidade obtida após a utilização do filtro FDR para realizar a correção de NMO em todas as seções filtradas com os outros métodos de filtragem.

### 1.2.4 Empilhamento

A etapa de empilhamento consiste basicamente na soma de todas as amplitudes dos sinais presentes em uma família CDP e essa técnica já é por si só bastante poderosa, visto que os eventos incoerentes irão ser atenuados ao sofrerem interferência destrutiva durante o empilhamento ao passo que os eventos coerentes serão realçados ao sofrerem uma interferência construtiva (Silva, 2004).

Essa etapa é de fundamental importância no processamento sísmico, pois é onde obtém-se a seção sísmica assim falando. Conforme explicado acima é muito importante que o ruído coerente ground-roll seja atenuado, pois a coerência deste poderia comprometer seriamente a resolução na seção sísmica empilhada.

## CAPÍTULO 2

# Os métodos de filtragem

Após realizada a aquisição, os dados que foram gravados segundo um padrão estabelecido pela *Society of Exploration Geophysicists*-SEG, que pode ser em formato SEG-B, SEG-D, SEG-2 e SEG-Y; são levados para o processamento. Algum pré-processamento já pode ser feito imediatamente após a aquisição, como eliminação de tiros totalmente silenciados ou altamente ruidosos, mas o tratamento do sinal sísmico irá ser realmente feito durante a etapa de processamento.

A filtragem de dados sísmicos de reflexão constituem uma importante etapa no fluxograma de processamento sísmico, visto que é através dessa que o geofísico procura atenuar os ruídos que irão dificultar o mapeamento de refletores na seção sísmica empilhada. A filtragem é realizada tendo em mente as características do ruído que se deseja eliminar, sendo que é de extrema importância que se evite eliminações bruscas em partes de bandas do sinal e a criação de artefatos numéricos, se isso for evitado, o resultado será um aumento significativo da razão sinal/ruído, proporcionando uma seção empilhada de boa qualidade.

### 2.0.5 Passa-Banda

Existem muitos filtros de frequência com aplicação na filtragem de sinais sísmicos de reflexão como: corta-alta ou passa-baixa, corta-baixa ou passa-alta, passa-banda etc. O filtro que fora usado afim de comparação foi a filtragem Passa-Banda (PB), que classicamente fora usada para filtragem de ruídos presentes em dados geofísicos, sendo que devido a praticidade do filtro PB, este pode ser aplicado em diferentes etapas do fluxograma de processamento.

O filtro PB do tipo trapezoidal, envolve em se definir uma zona da faixa de frequência do sinal que irá ser preservada, uma zona que será eliminada e ainda uma região conhecida como *slope*, que será atenuada. A figura 2.1, ilustra o filtro PB.

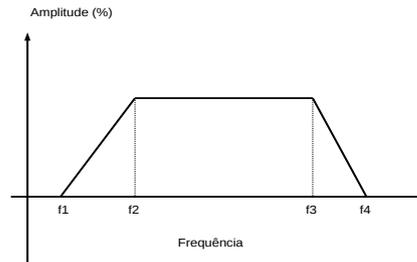


Figura 2.1: Filtro de frequências do tipo trapezoidal passa-banda.

O Princípio de funcionamento do filtro PB é simples. Primeiro é necessário que levemos os dados que se encontravam no domínio do tempo para o domínio da frequência, para isso utilizamos a Transformada Direta de Fourier 1D, em seguida multiplicamos o espectro de amplitude do sinal por uma função transferência (Silva, 2004), e por fim trazemos os dados para o domínio do tempo através da Transformada Inversa de Fourier 1D.

Tomemos  $s(t)$  como uma função contínua no tempo e  $F(w)$  como a função transferência, sendo assim, tomando a Transformada Direta de Fourier 1D da função  $s(t)$ , temos:

$$S(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-iwt} dt \quad (2.1)$$

onde  $S(w)$  representa o sinal no domínio da frequência. Agora podemos separar o sinal  $S(w)$  em termos de amplitude e fase, sendo assim fica:

$$S(w) = A(w)\phi(w) \quad (2.2)$$

Tomando a função transferência  $F(w)$ , que pode ser definida como:

$$F(w) = \begin{cases} 1 & w \leq w_c \\ 0 & \text{outros} \end{cases}$$

Onde  $w_c$  representa a frequência de corte.

A aplicação do filtro envolve a convolução da função transferência  $F(w)$  com o espectro de amplitude  $A(w)$  do sinal no domínio da frequência. Pelo teorema da convolução, esta operação no domínio da frequência é dada por:

$$Y(w) = A(w)F(w) \quad (2.3)$$

Retomando o sinal  $\bar{S}(w) = Y(w)\phi(w)$  e aplicando a Transformada inversa de Fourier temos:

$$\bar{s}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{S}(w)e^{-iwt} dw \quad (2.4)$$

A filtragem passa banda também pode ser realizada no domínio do tempo, primeiro usa-se a Transformada inversa de Fourier na função transferência e em seguida a convolve com o sinal do dado no domínio do tempo (Silva, 2004).

Este método de filtragem apresenta uma desvantagem quando o assunto é preservar a banda de frequência do sinal, pois ele só tenta identificar o ruído através do seu conteúdo de frequências e quando se realiza o corte, parte do sinal que estava sobreposto a ruído também é eliminado, o que não proporciona ganhos significativos na razão sinal/ruído.

### 2.0.6 A filtragem F-K

A filtragem f-k (Frequência-número de onda) é sem sombras de dúvidas uma importante ferramenta na etapa de filtragem de dados sísmicos de reflexão, visto que esta usa também informações acerca do número de onda do sinal (número de ciclos no espaço) para fazer distinção entre o que é desejável e indesejável no sismograma.

Para se trabalhar com o dado no domínio f-k é necessário aplicar a Transformada de Fourier 2D. A primeira transformada de Fourier converte o eixo do tempo para o eixo da frequência e a segunda converte o eixo do espaço para o eixo do número de onda. Vale lembrar que a relação entre o comprimento de onda  $\lambda$  e o número de onda  $k$  é dada através da seguinte relação  $k = \frac{1}{\lambda}$ . É fácil de ver que assim como a frequência (ciclo/segundo) é o inverso do período, o número de onda ( $metro^{-1}$  ou ciclos/metro) é o inverso do comprimento de onda. Sabendo que a velocidade de um evento está diretamente ligada a sua inclinação em uma seção de tiro comum e assumindo que os dois eventos possuem o mesmo conteúdo de frequências, sendo assim temos:

$$v_1 = \lambda_1 f \quad (2.5)$$

$$v_2 = \lambda_2 f \quad (2.6)$$

Onde:  $v_1$  e  $v_2$  as velocidades dos eventos 1 e 2 respectivamente e  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  os comprimentos de onda dos eventos 1 e 2 também respectivamente.

Sabendo que  $\lambda_1 = \frac{1}{k_1}$  e  $\lambda_2 = \frac{1}{k_2}$  e substituindo nas equações (2.5) e (2.6) fica:

$$v_1 = \frac{1}{k_1} f \quad (2.7)$$

$$v_2 = \frac{1}{k_2} f \quad (2.8)$$

É fácil de ver que  $k_1$  e  $k_2$  é inversamente proporcional a  $v_1$  e  $v_2$  respectivamente. Logo, os eventos de maior inclinação no domínio do tiro (menor velocidades) possuirão menor inclinação no domínio f-k e os eventos de menor inclinação no domínio do tiro (maior velocidade) terão maior inclinação no domínio f-k (Figura 2.2). Com base nas características do nosso ruído e admitindo a coerência do mesmo, podemos eliminá-lo tomando uma zona de corte, agora não só tomando como referência as amplitudes e a faixa de frequência do ruído, mas também com informações sobre a inclinação do mesmo (ou seja, a sua velocidade). Devido a essa propriedade da filtragem f-k, podemos dizer que esse é também um filtro de velocidades.

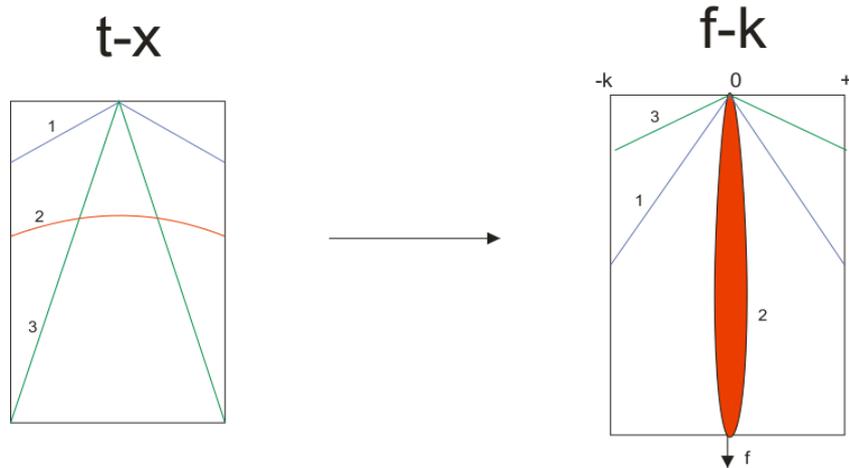


Figura 2.2: Representação dos eventos no domínio do tiro e fk respectivamente.

Tomando  $A(t, x)$  como uma função dependente do tempo  $t$  e do espaço  $x$ . Podemos calcular a sua transformada de Fourier 2D através da seguinte equação:

$$\bar{A}(w, k_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(t, x) e^{ik_x x - iw t} dt dx \quad (2.9)$$

Sendo  $\bar{A}(w, k_x)$  a transformada 2D de Fourier (Figura 2.3).

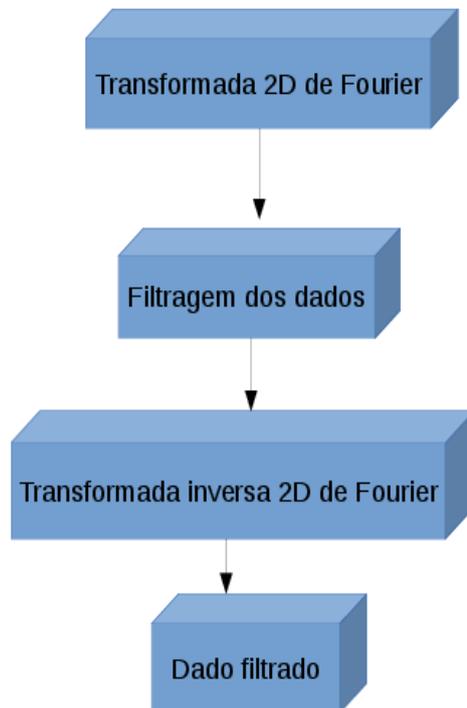


Figura 2.3: Fluxograma para o filtro f-k

Após realizada a passagem do dado para o domínio f-k, o geofísico define a zona de corte, ou seja, a zona que contém o evento indesejável que ele irá eliminar. Mas apesar de largamente usado para a filtragem de eventos lineares, esse método de filtragem apresenta uma pequena desvantagem, pois ao se eliminar o ruído também se elimina parte da faixa de frequências do sinal o que, assim como o filtro PB, acaba reduzindo a razão sinal/ruído do dado.

### 2.0.7 Deconvolução

A deconvolução é uma das principais etapas dentro do processamento sísmico, pois é através dessa que se procura alcançar a maior resolução temporal possível. Isso é alcançado pela compressão do pulso sísmico o convertendo em um impulso, visando obter no sismograma a resposta impulsiva da terra, a função refletividade. Esta é muito usada pela indústria para

atingir esse objetivo e também é de fundamental importância na atenuação de reflexões múltiplas, porém no presente trabalho a deconvolução será usada com o objetivo de se obter uma seção empilhada com a maior resolução temporal possível por meio da compressão do pulso sísmico e em conjunto com o filtro FDR aumentar significativamente a razão sinal/ruído do dado através da atenuação do *ground-roll*.

### 2.0.8 A deconvolução de Wiener-Levinson

Tomemos a seguinte representação para o modelo convolucional 1D do traço sísmico no domínio do tempo:

$$x(t) = w(t) * e(t) + n(t) \quad (2.10)$$

Onde,

- $x(t)$  = Traço sísmico.
- $w(t)$  = Assinatura da fonte.
- $e(t)$  = Resposta impulsiva da terra.
- $n(t)$  = Ruído aleatório.
- $*$  = Operador de convolução.

No desenvolvimento da deconvolução nos dados sísmicos um conjunto de imposições são tomadas, dentre elas estão (Yilmaz, 2001):

1. A terra é constituída de camadas planas e horizontais de velocidade constante.
2. A fonte gera somente ondas compressionais e a incidência é normal.
3. A assinatura da fonte é estacionária.
4. A componente  $n(t)$  do ruído é nula.
5. A assinatura da fonte  $w(t)$  é conhecida.
6. A refletividade é um processo aleatório.
7. O pulso é de fase mínima.

Tomando a premissa 4 como base temos:

$$x(t) = w(t) * e(t) \quad (2.11)$$

Se tomarmos um filtro  $f(t)$  que convolvido com o sismograma irá resultar na função refletividade das camadas terrestres, fica:

$$e(t) = f(t) * x(t) \quad (2.12)$$

Substituindo (2.12) em (2.11) temos:

$$x(t) = w(t) * f(t) * x(t) \quad (2.13)$$

Ao se eliminar  $x(t)$ , resulta:

$$\delta(t) = w(t) * f(t) \quad (2.14)$$

Onde  $\delta(t)$  é a função delta de Kronecker (Yilmaz, 2001). Resolvendo para  $f(t)$  :

$$f(t) = \delta(t) * \frac{1}{w(t)} \quad (2.15)$$

Com base nas deduções acima fica evidente que o filtro ideal é aquele que é o inverso da *wavelet*. Para o caso em que  $w(t)$  é conhecida temos um processo de deconvolução determinística, caso contrário usa-se a deconvolução de Wiener-Levinson para o cálculo do filtro inverso (Yilmaz, 2001).

### 2.0.9 A deconvolução preditiva de Wiener-Levinson (L=1)

Tomando a deconvolução preditiva de Wiener-Levinson na forma discreta, temos:

$$\tilde{x}_{t+1} = \sum_{k=1}^n x_{t-k+1} \tilde{a} \quad (2.16)$$

Onde  $\tilde{x}_{t+1}$  e  $\tilde{a}_k$  representam o sinal predito no tempo  $t + 1$  e o operador de erro preditivo direto, respectivamente (Almeida, 2013).

Levando em conta o erro associado a predição da amostra  $\tilde{x}_{t+1}$  obtém-se:

$$e_{t+1} = x_{t+1} - \tilde{x}_{t+1} \quad (2.17)$$

Que representa a diferença entre o sinal desejado e o calculado.

A equação (2.17) pode ser escrita por meio da equação (2.16) da seguinte forma:

$$e_{t+1} = x_{t+1} - \sum_{k=1}^n x_{t-k+1} \tilde{a}_k \quad (2.18)$$

Assim para  $n = 3$ , é possível escrever o sistema descrito na matriz (2.19), onde  $m$  é o número de amostras do sinal.

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_{t+1} \\ \vdots \\ e_m \\ e_{m+1} \\ e_{m+2} \\ e_{m+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_0 & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & x_0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{t+1} & x_t & x_{t-1} & x_{t-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & x_{m-1} & x_{m-2} & x_{m-3} \\ 0 & x_m & x_{m-1} & x_{m-2} \\ 0 & 0 & x_m & x_{m-1} \\ 0 & 0 & 0 & x_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\tilde{a}_1 \\ -\tilde{a}_2 \\ -\tilde{a}_3 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

resolve-se então o sistema de modo que o erro quadrático seja mínimo. Desta forma, minimizando o erro quadrático através do método dos mínimos quadrados e colocando na forma das equações normais (ENs), o sistema a ser resolvido pode ser escrito como na equação (2.20).

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_1 \\ r_{n-1} & \dots & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{a}_1 \\ -\tilde{a}_2 \\ \vdots \\ -\tilde{a}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

A matriz da esquerda na equação (2.20) representa a autocorrelação do pulso sísmico e por ser bandeada-estruturada e simétrica, leva o nome de Toeplitz simétrica. Devido a essa propriedade, pode-se usar a recursão de Levinson para encontrar a solução das ENs (Yilmaz, 2001). Após a resolução do sistema acima, obtém-se o operador de erro direto, caracterizado pelo vetor  $\tilde{a}$ .

O vetor  $\tilde{a}$  é o vetor que minimiza o erro do sistema descrito na equação (2.20). Pode-se definir a soma dos erros minimizados  $E_{a,n}$  como uma função deste vetor, como na equação (2.21) (Almeida, 2013).

$$E_{a,n} = r_0 - \sum_{k=1}^n r_{1+k} \tilde{a}_k \quad (2.21)$$

Deste modo, utilizando as equações (2.20) e (2.21), pode-se obter a forma ampliada das ENs, que pode ser observada na equação (2.22).

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_n \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & r_{n-1} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & r_1 \\ r_n & r_{n-1} & \dots & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\tilde{a}_1 \\ -\tilde{a}_2 \\ \vdots \\ -\tilde{a}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a,n} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

É importante observar que, embora o procedimento mostrado nesta seção obtenha o operador preditivo de erro direto ( $a_n = 1, \dots, a_{n-1}, a_n$ ), esta também pode ser utilizado para se obter o operador preditivo de erro inverso, dado pela sequência ( $b_n = b_n, \dots, b_1, 1$ ) (Almeida, 2013).

### 2.0.10 A deconvolução preditiva adaptativa

Um das premissas admitidas na deconvolução preditiva convencional é de que a assinatura da fonte é estacionária, o que não é verdade para dados sísmicos reais. Com o objetivo de contornar o problema da estacionariedade, a deconvolução é realizada utilizando o conceito de janelas deslizantes em tempo, ou seja, define-se janelas de comprimento  $N$  onde o filtro é calculado e em seguida a janela é deslocada e o filtro é novamente calculado. Assim sendo, o caráter estacionário da assinatura da fonte é violado em menor grau (Montenegro, 1996). A aplicação da deconvolução de Wiener-Levinson utilizando janelas deslizantes em tempo segue o seguinte raciocínio:

- Defini-se uma janela de comprimento  $N$ .
- Admite-se que as amostras são nulas do lado de fora da janela.
- Aplica-se a deconvolução de Wiener-Levinson dentro da janela.
- Desloca-se a janela no tempo.
- Aplica-se novamente a deconvolução de Wiener-Levinson.

Durante o processo, conta-se quantas vezes determinada amostra fora deconvolvida e a amostra deconvolvida final será a média dessas amostras. A Figura 2.4 ilustra o método.

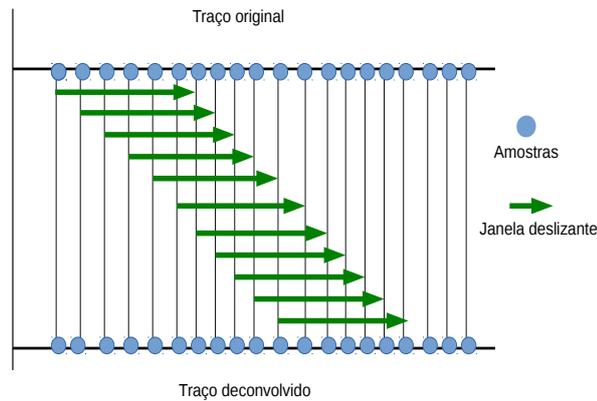


Figura 2.4: Representação da deconvolução adaptativa com um traço de 20 amostras e janela de 7 coeficientes. Para cada tempo, a amostra filtrada final é a média das amostras filtradas, naquele tempo, dentro da janela deslizante.

Apesar de considerar nulas as amostras do lado de fora da janela deslizante, o que não representa a realidade do dado sísmico real, o objetivo é mostrar que em conjunto com o filtro FDR, a deconvolução preditiva adaptativa de Wiener-Levinson pode proporcionar resultados muito satisfatórios.

## CAPÍTULO 3

### A filtragem direcional radial

#### 3.0.11 O operador de derivada

O método das diferenças finitas não é de uso exclusivo da geofísica, porém esse método é de fundamental importância quando o assunto é a modelagem de dados sísmicos utilizando a equação da onda e quando o assunto é a filtragem de eventos lineares utilizando filtros de derivadas (Oliveira, 2009).

O método de diferenças finitas consiste em uma aproximação numérica para as derivadas em meios discretos. Neste trabalho utiliza-se a derivada de primeira ordem, com o objetivo de filtrar o evento linear na seção de tiro comum. Para isso toma-se um foco nesse domínio e a partir desse se calcula a derivada na direção de todas as amostras da malha tomando o foco como referência.

A matemática envolvida na aproximação da derivada por meio de diferenças finitas pode ser obtida através da aproximação de Taylor. Tomemos a seguinte função:

$$F(x) = F(m\Delta x), m = 1, 2, \dots; \quad (3.1)$$

a sua aproximação em série de Taylor é dada por:

$$F(x + \Delta x) = F(x) + \Delta x \frac{\partial F(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 F(x)}{\partial x^2} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 F(x)}{\partial x^3} + \dots; \quad (3.2)$$

$$F(x - \Delta x) = F(x) - \Delta x \frac{\partial F(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 F(x)}{\partial x^2} - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 F(x)}{\partial x^3} + \dots; \quad (3.3)$$

Subtraindo (3.3) de (3.2) obtemos:

$$F(x + \Delta x) - F(x - \Delta x) = 2\Delta x \frac{\partial F(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 F(x)}{\partial x^3} + \frac{2(\Delta x)^5}{5!} \frac{\partial^5 F(x)}{\partial x^5} + \dots \quad (3.4)$$

Logo, a primeira derivada de  $F(x)$  em relação a  $x$  pode ser expressa por:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} = \frac{F(x + \Delta x) - F(x - \Delta x)}{2\Delta x} - \left[ \frac{2(\Delta x)^2}{3!} \frac{\partial^3 F(x)}{\partial x^3} + \frac{2(\Delta x)^4}{5!} \frac{\partial^5 F(x)}{\partial x^5} + \dots \right] \quad (3.5)$$

Desprezando os termos de ordens superiores, o que obtemos é uma aproximação de segunda ordem.

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} = \frac{F(x + \Delta x) - F(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (3.6)$$

Observando a equação (3.6) que calcula a derivada na direção  $x$  podemos observar que isso é simplesmente uma perturbação de peso  $\Delta x$  na função  $F(x)$  para frente e para trás e dividido por  $2\Delta x$ .

Os termos  $F(x + \Delta x)$  e  $F(x - \Delta x)$  da equação (3.6) representam a função predita em um ponto anterior e posterior a um ponto central onde se deseja calcular a derivada. Para prevermos a função "à frente" e "à trás" é necessário se interpolar tomando todos os pontos do *grid* do operador como referência.

Para estimar a derivada na matriz dos dados é necessário se calcular operadores de derivada, que podem ter as mais variadas dimensões. De um modo geral, o operador de derivada pode ser representado da seguinte forma  $\mathbf{O}(n, m)$ , onde  $n$  representa o número de linhas dos operadores e  $m$  o número de colunas (Mello, 2008; Porsani, 2008).

O objetivo desses operadores de derivadas é estimar a derivada em uma região na matriz dos dados que podemos tomar como coordenadas  $\mathbf{A}(nz, nx)$ , onde  $nz$  representa o número de amostras em um traço e  $nx$  representa a quantidade de traços que serão filtrados.

A Figura 3.1 ilustra o operador de derivada 2D de dimensão  $3 \times 3$ .

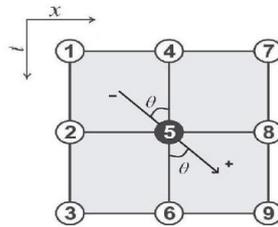


Figura 3.1: Operador de derivada

Seja  $f(x, t) = f(\vec{r})$  a representação de um campo, onde os valores interpolados em uma direção  $\vec{r}$  serão:

$$f(\vec{r}^+) \approx \sum_{i=1}^n w_i^+ A_i = I(\vec{r}^+) = I^+ \quad (3.7)$$

$$f(\vec{r}^-) \approx \sum_{i=1}^n w_i^- A_i = I(\vec{r}^-) = I^- \quad (3.8)$$

No cálculo dos pesos  $w_i$  usamos o método de interpolação de Shepard (Shepard, 1968), que é baseada no inverso da distância.

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}} \quad (3.9)$$

onde  $d_j = |\vec{r} - \vec{r}_j|$

Portanto a derivada na direção de  $\vec{r}$  pode ser estimada através da equação:

$$\frac{df(x, t)}{d\vec{r}} \approx \frac{I(\vec{r}^+) - I(\vec{r}^-)}{2\delta_r} = \sum_{i=1}^n \frac{(w^+ - w^-)A_i}{2\delta_r}, \quad (3.10)$$

Onde  $\delta_r > 0$  representa a perturbação na direção  $\vec{r}$  Sendo assim o operador de derivada é dado por:

$$D_r = O^+ - O^- = \frac{(w^+ - w^-)}{2\delta_r}, i = 1, \dots, n \quad (3.11)$$

### 3.0.12 A escolha do foco

Se calcular as derivadas irradiando de um foco no domínio de uma seção de tiro comum fora pensado com o objetivo de se evitar a filtragem em outros domínios, visto que muitas vezes são gerados ruídos numéricos ao se trabalhar nesses domínios.

A escolha do foco foi estudada cabalmente e observou-se que a posição que produzia os melhores resultados era quando tomada do ponto de origem do ruído (tomado como que na parte superior central do sismograma), sendo que quando calculada a derivada na direção do evento inclinado e em seguida aplicada as amostras da malha na respectiva inclinação, o resultado é a atenuação do evento linear presente no sismograma. Como as inclinações dos eventos no sismograma estão relacionados com a velocidade desses, pode-se dizer que assim como o filtro FK, o filtro FDR também é um filtro de velocidades, que no presente trabalho visa atenuar o ruído de baixa velocidade, o *ground-roll*.

Levando isso em conta, implementamos usando a linguagem de programação FORTRAN o filtro FDR, que consiste em se tomar um foco de coordenadas  $(x_0, t_0)$  na matriz dos dados e a partir daí se calcular a derivada em todas as direções de mergulho. Após a

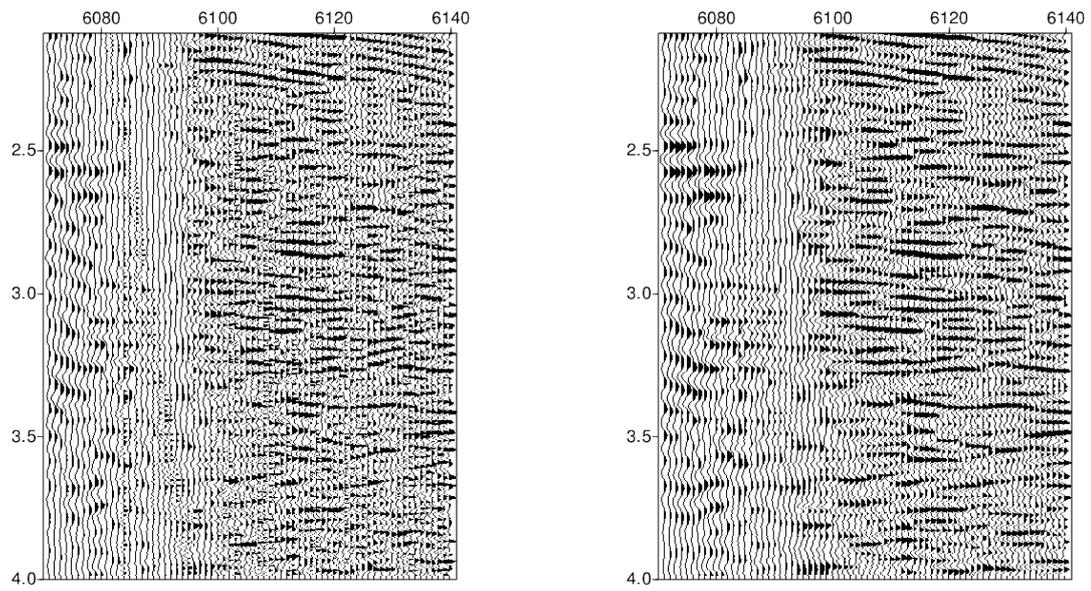
escolha do foco na matriz dos dados, recolhemos as amplitudes dessa matriz e calculamos as derivadas utilizando um operador simétrico  $\mathbf{O}(5, 5)$  com o fim de aumentar a precisão.

Partindo de um ângulo inicial que partia do foco até cada ponto do grid fizemos este operador varrer toda a matriz dos dados. Diferentemente da transformada radial, o método que apresentamos aqui, a derivada direcional radial não necessita transformar o dado para outro domínio, evitando assim ruídos numéricos decorrentes do processo de interpolação que eram gerados ao se trabalhar no domínio radial (Santos, 2013; Porsani, 2013).

### **3.0.13 A distância de predição e as altas frequências**

Durante o estudo da aplicação do filtro fora notado que com o aumento da distância de predição para operadores acima de  $\mathbf{O}(5, 5)$  o que ocorria era a filtragem de ruídos lineares de altas frequências (Figura 3.2), o que mostrou ser bastante interessante, visto que os dados da Bacia do Tacutu estavam extremamente contaminados por ruídos quase que verticais de altas frequências o que comprometia seriamente a razão sinal/ruído na seção sísmica empilhada e principalmente na etapa de deconvolução do dado.

A distância de predição muito grande quer dizer que o ponto de predição é tomado do lado de fora do operador de derivada. O resultado é uma seção com um conteúdo de baixas frequências, o que pode ser recuperado durante a etapa de deconvolução, pois devido a compressão do pulso alcança-se um aumento da resolução temporal.



(a) Tiro filtrado com ponto de predição dentro do operador.

(b) Tiro filtrado com o ponto de predição do lado de fora do operador.

Figura 3.2: Comparando as diferentes distâncias de predição.

## CAPÍTULO 4

### Resultados

Com o objetivo de testarmos o novo método de filtragem foi realizado o processamento de uma linha sísmica da Bacia do Tacutu. Dado que fora adquirido pelo CPGG-UFBA junto a ANP (Silva e Porsani, 2006). Os parâmetros de aquisição estão apresentados na tabela abaixo.

Parâmetros de aquisição	
Linha	204-RL-247
Lanço	3850-100-0-100-1050
t(s)	4
$\Delta t(ms)$	4
GC(%)	4800
$\Delta s(m)$	50
$\Delta g(m)$	50
Nc	96

Optou-se por usar a plataforma GêBr de processamento sísmico, de uso público e disponível (Biloti, 2013). O objetivo é mostrar que esta plataforma representa uma poderosa interface para o ensino e pesquisa. A GêBr é uma interface amigável que tem como objetivo fornecer ao usuário a facilidade de processamento que os softwares comerciais apresentam. É construída com base no pacote livre de processamento sísmico, Seismic Unix(SU) do Center for wave Phenomena (CWP) da School of Mines. O SU assim como a plataforma GêBr possuem livre distribuição.

Esta plataforma permite a inserção de módulos externos que pode ser desde um programa que realiza a filtragem até ao que realize a migração do dado sísmico com um novo método desenvolvido na academia ou na indústria, o que faz dessa plataforma uma excelente oportunidade de mostrar o que é desenvolvido nas instituições de ensino.

#### 4.0.14 Fluxograma adotado

Conforme já citado, cabe ao geofísico decidir quais etapas do fluxograma serão usadas por ele afim de atingir os seus objetivos, mas o que irá influenciar na sua escolha são:

tempo para o processamento, recursos disponíveis nos software adotados e objetivos. Como o presente trabalho envolve o teste de um novo método de filtragem de dados sísmicos de reflexão, a etapa de migração foi evitada para dar destaque ao filtro FDR. Lembrando que para geração de uma seção sísmica empilhada com uma alta resolução temporal e espacial etapas como: migração, deconvolução, correção estática e correção DMO são indispensáveis.

Para o presente trabalho o fluxograma adotado fora o seguinte (Figura 4.1):

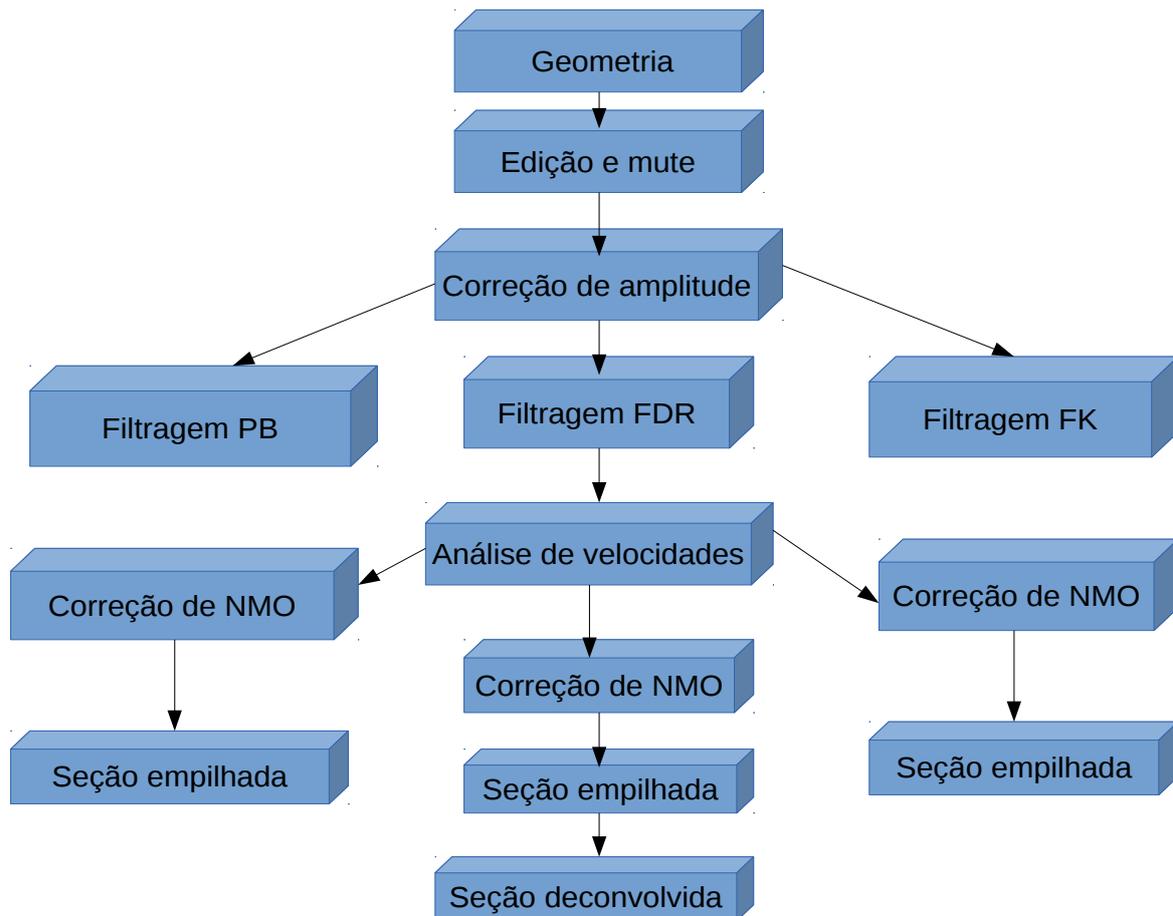


Figura 4.1: Fluxograma de processamento adotado

#### 4.0.15 Filtragem dos dados

Com o objetivo de se testar os métodos de filtragem, foi separado o tiro 64 da linha 204-RL-207 da bacia do Tacutu. Depois de gerado o espectro de amplitude do tiro, notou-se que o ruído estava dentro da banda de frequências entre 5-12 Hz (Figura 4.2) e logo após escolher os pontos do trapézio de frequências para o filtro passa-banda, aplicou-se o filtro. Vale ressaltar que na aplicação do filtro PB fora necessário tomar uma região para atenuação do ruído na banda de frequência maior que 12 Hz, para esse caso específico adotou-se 15 Hz,

visto que o ground-roll invade a banda de frequências do sinal, o que torna a atenuação desse ruído através desses métodos convencionais complicado, pois ao se rejeitar parte da banda de frequências onde se encontra o ruído parte do sinal também é eliminado, o que não gera ganhos significativos na razão sinal/ruído, as vezes até reduzindo essa razão.

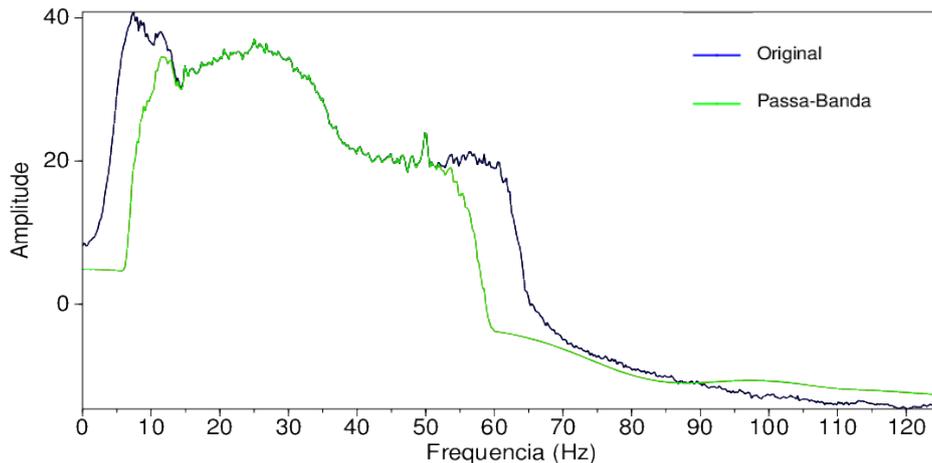


Figura 4.2: Espectros de amplitudes dos tiros original e filtrado.

A Figura 4.6b mostra o resultado da filtragem PB. Percebe-se que ocorre uma atenuação severa do ground-roll, o que acaba por eliminar também parte do sinal que se encontrava na região onde estava o ruído coerente. O resultado é uma seção de tiro comum sem ganhos significativos no que diz respeito a revelar eventos que se encontravam mascarados pela energia do ruído.

A filtragem FK tenta evitar essa perda demasiada de sinal utilizando informações também acerca do número de onda. Conforme já visto, o dado ao ser mudado para o domínio FK, os eventos que possuem menores inclinações se encontrarão mais inclinados e a recíproca é verdadeira, e as reflexões se encontrariam na vertical no domínio FK. Com isso em mente e baseada nas características do ruído coerente ground-roll levou-se o dado para o domínio FK e após definida as zonas de corte, houve uma rejeição de parte de bandas de frequências da região onde estava confinado o ruído (Figura 4.3).

A Figura 4.6c nos mostram o porquê desse filtro ser tão usado nos fluxogramas de processamento sísmico, este além de atenuar o ground-roll também conseguiu revelar alguns eventos de baixas frequências na região antes ocupada pelo ground-roll. Consegue-se notar

agora eventos abaixo de 2.5s no sismograma. Porém, esse filtro possui uma desvantagem, pois ao se eliminar as zonas onde o ruído se encontra, estamos também eliminando parte do sinal sísmico, visto que o ruído coerente ground-roll invade a banda de frequências do sinal o que não nos permite obter uma significativa melhora da razão sinal/ruído após a filtragem FK.

O espectro de amplitudes gerado após a filtragem FK em comparação com a filtragem PB, mostra que na região onde predominava o ground-roll entre 5 Hz e 12 Hz o filtro FK evitou um atenuação severa nessa região, o que significa maior preservação de partes de bandas do sinal de baixas frequências (Figura 4.4).

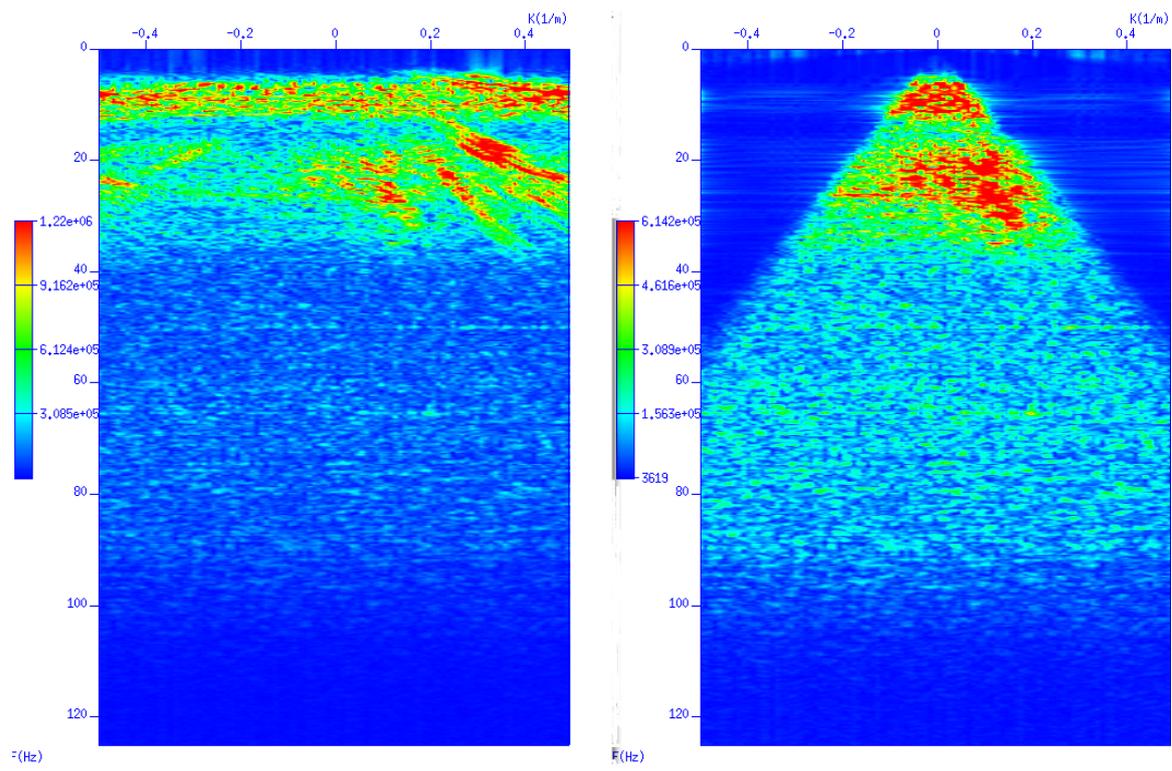


Figura 4.3: Tiro no domínio Fk antes e após a filtragem.

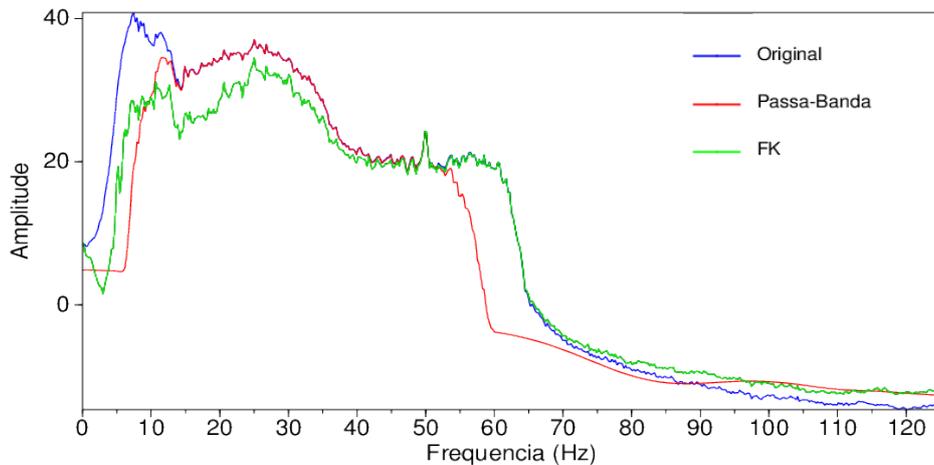


Figura 4.4: Espectros de amplitudes comparando as filtragens.

A filtragem FDR consiste em se definir um foco em uma seção de tiro comum e a partir desse, se calcula as derivadas na direção de todas as amostras do *grid*, visto que essa é a nova abordagem apresentada para o filtro de derivada. A posição do foco que irá produzir os melhores resultados é aquela tomada na origem do ruído linear na seção de tiro comum, que nesse caso, como se tratava de um arranjo *split-spread* assimétrico, foi escolhido na região central superior da seção de tiro comum.

A filtragem utilizando o filtro FDR se mostrou bastante eficiente na atenuação do ground-roll e em revelar as reflexões que antes se encontravam mascaradas pelo ruído coerente (Figura 4.6d). A região onde estava presente o ground-roll agora revela eventos de baixas frequências e nos mostra uma continuidade das reflexões que antes não podiam ser observadas devido ao ruído altamente energético. Algo a se destacar na utilização do filtro FDR é a presença de reflexões em tempos mais tardios no sismograma assim como fora observado também na seção de tiro comum filtrada com o filtro FK (Figura 4.6c). Percebe-se que na região abaixo de 2s que antes se encontrava fortemente contaminada com um ruído de alta frequência (Figura 4.6a) agora não mais existe a presença desse ruído (Figura 4.6d), isso ocorre porque este ruído que aparecia de forma vertical em cada refletor fora tratado como um evento de muito baixa velocidade pelo filtro FDR, o que proporcionou a sua devida atenuação.

Algo a se destacar na aplicação do filtro FDR quando comparada com os filtros convencionais é a presença de uma continuidade das reflexões nas seções de tiro comum nas regiões onde se encontravam o ground-roll, o que é visto na região entre 1s e 2s na Figura 4.6db.

Uma rápida análise do espectro de amplitudes (Figura 4.5) que compara os filtros FDR e FK nos mostram que ambos os filtros não causam uma redução significativa na faixa de frequências entre 5 Hz e 12 Hz, o que se apresenta como uma vantagem de ambos os métodos, visto que não ocorre significativa perda do sinal durante o processo de atenuação e através de um olhar mais cuidadoso pode-se notar que o filtro FDR atenua o ground-roll reduzindo menos a amplitude nessa região quando comparado com o filtro FK. O resultado é um realce do sinal na faixa entre 15 Hz e 40 Hz na seção filtrada com o filtro FDR.

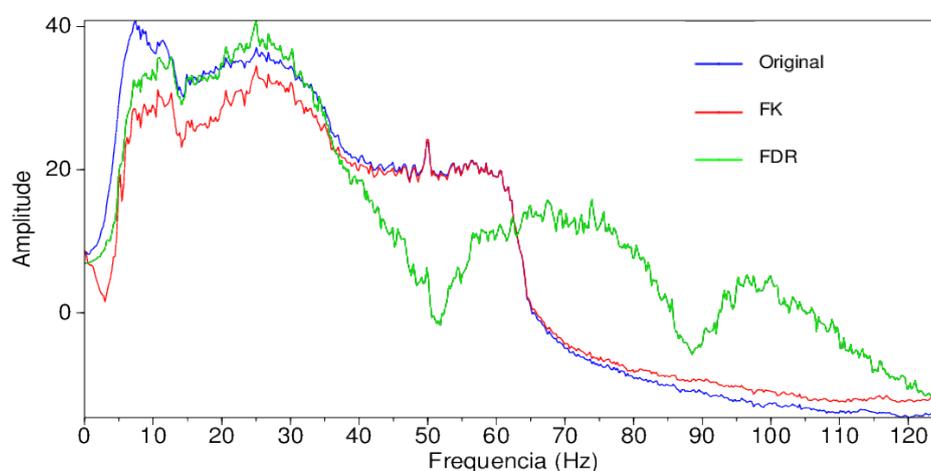
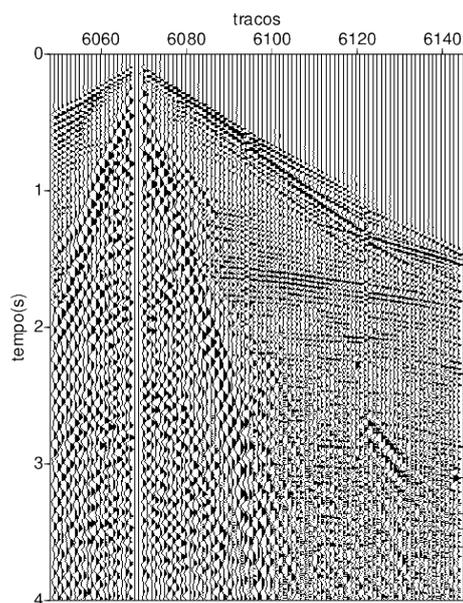
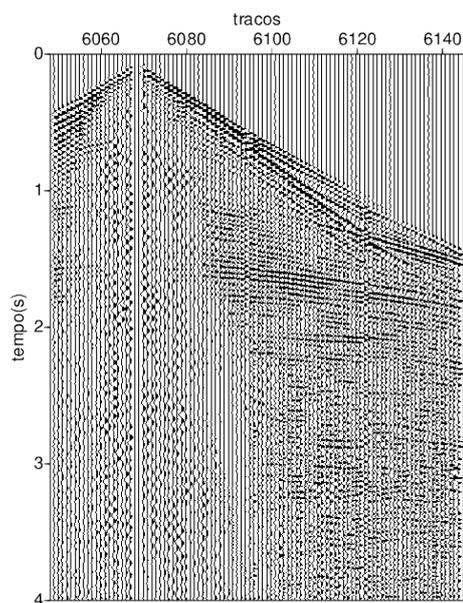


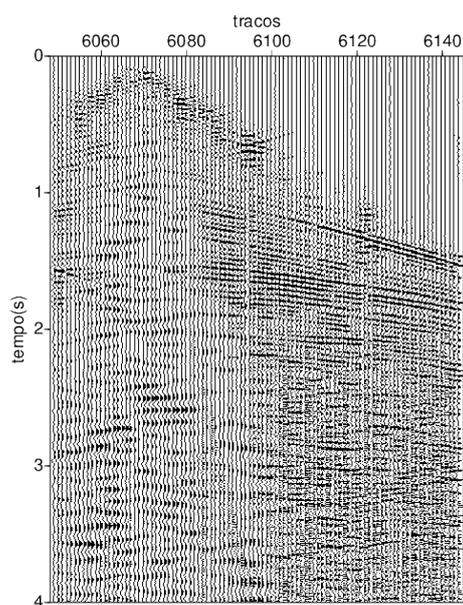
Figura 4.5: Espectros de amplitudes comparando as filtragens FK e FDR.



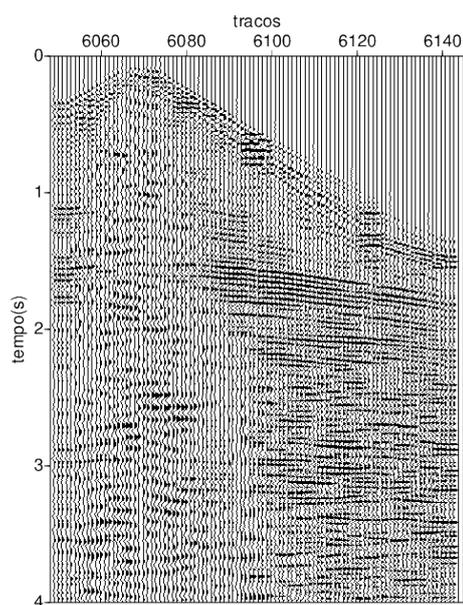
(a) Tiro Original



(b) Tiro após o filtro PB



(c) Tiro após o filtro FK



(d) Tiro após o filtro FDR

Figura 4.6: Resultado da aplicação dos filtros.

#### 4.0.16 Influência na análise de velocidades

Com isso em mente fora gerado painés de *semblance* com o objetivo de verificar a eficácia dos métodos de filtragem na eliminação de falsos positivos e no aumento da razão sinal/ruído. Mas antes foi necessário se elaborar *supergathers* visto que a cobertura CMP da linha 204-RL-207 da Bacia do Tacutu era relativamente baixa, e isso fora feito com o auxílio de *shells scripts*.

A Figura 4.7 mostra um CMP sem aplicação de filtros e seu respectivo *semblance*, nota-se que a coerência é muito baixa, isso devido a baixa razão sinal/ruído no dado. Após a aplicação do filtro FK percebe-se um aumento da razão sinal/ruído e melhora da coerência, mas ainda assim existe uma dificuldade para o mapeamento das velocidades abaixo de 2,5s (Figura 4.8). Vale lembrar que o filtro FK fora usado para atenuar o ruído de baixas frequências, ground-roll, o que não fora feito para o ruído de alta frequência que contaminava região abaixo de 1,5s (Figura 4.7).

A *semblance* obtida após a filtragem FDR apresenta uma maior coerência e o aumento da razão sinal/ruído é evidente ao se observar os eventos abaixo de 2,5s (Figura 4.9). O *supergather* gerado após a aplicação do filtro FDR mostra uma atenuação significativa do ground-roll e um realce das reflexões e até mesmo o ruído de alta frequência fora atenuado, quando tomado o ponto de predição do lado de fora do operador de derivada.

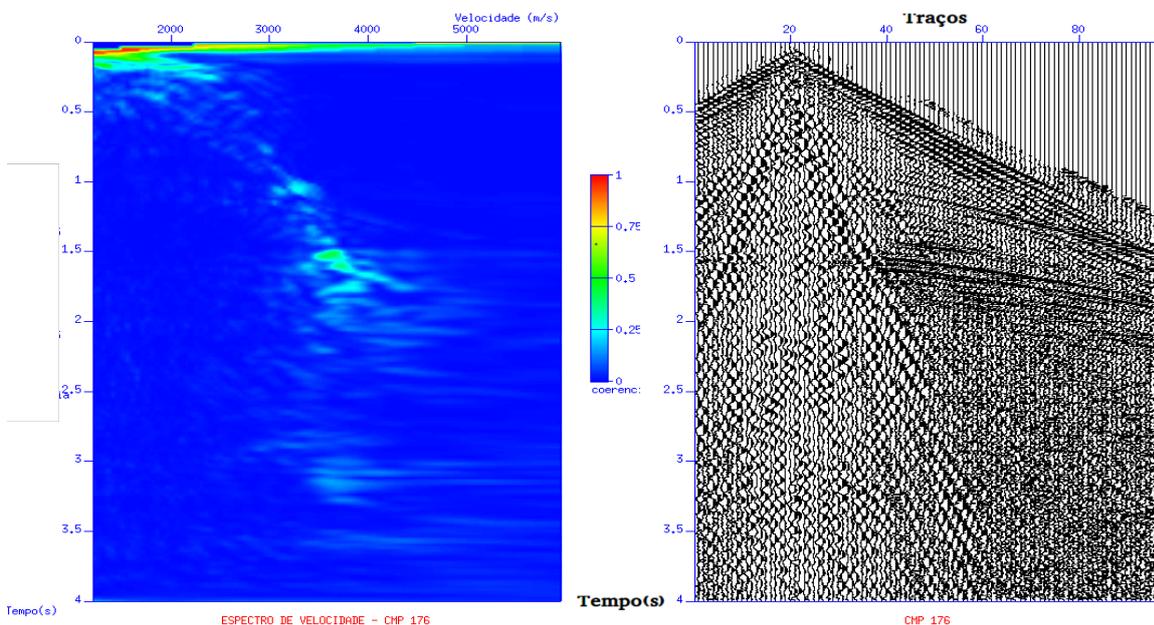


Figura 4.7: Semblance do CDP 176 sem filtros

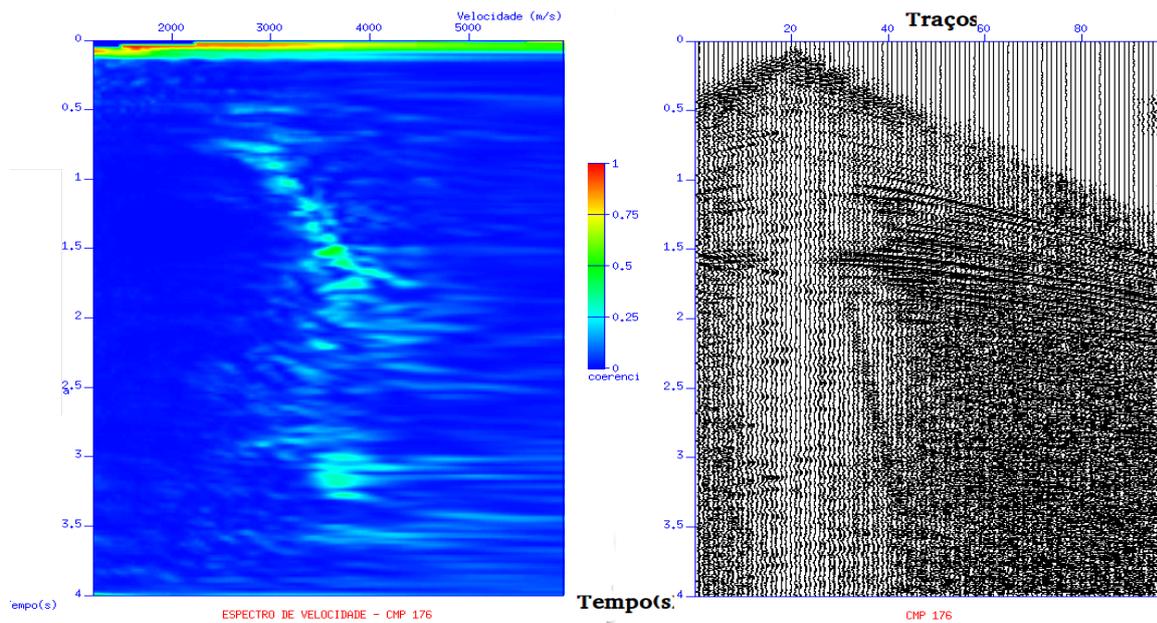


Figura 4.8: Semblance do CDP 176 após a filtragem FK

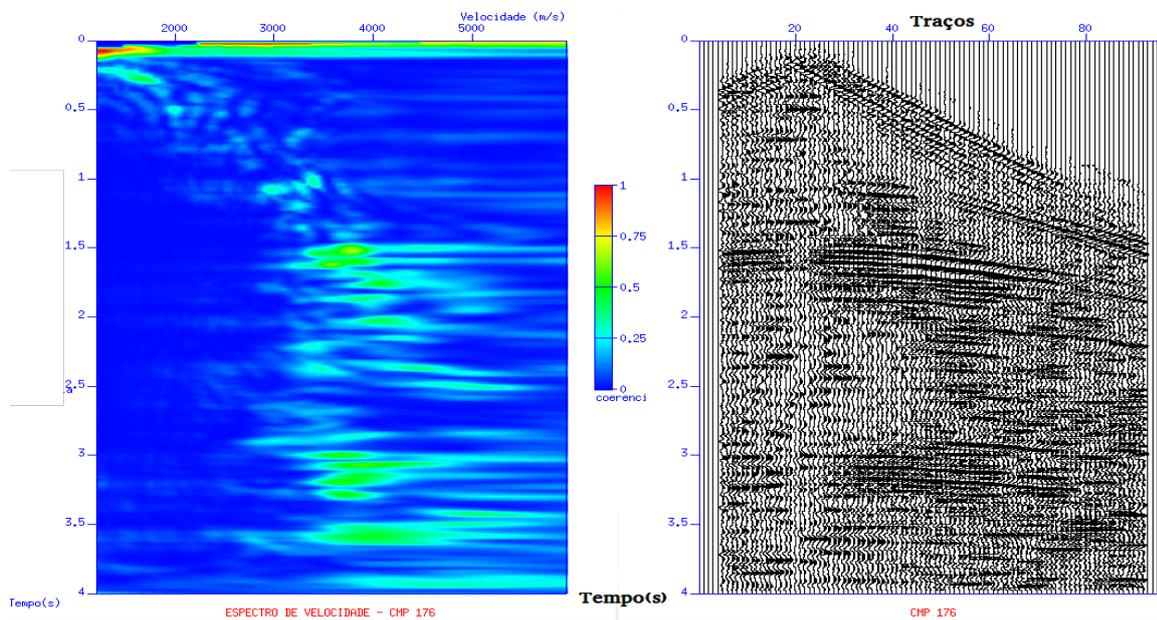


Figura 4.9: Semblance do CDP 176 após a filtragem FDR

#### 4.0.17 Seções empilhadas

O ruído coerente ground-roll se manifesta na seção sísmica empilhada na forma de eventos lineares com inclinações para ambos os lados o que acaba prejudicando o mapeamento dos refletores sísmicos. A Figura 4.10 mostra a seção empilhada sem filtros; nota-se uma seção com muito baixa razão sinal/ruído, o que torna um desafio para o intérprete mapear os refletores e interpretar as possíveis estruturas geológicas favoráveis para a migração e acumulação de hidrocarbonetos.

Quando observamos a seção filtrada com o filtro PB (Figura 4.11), percebe-se que apesar da atenuação do ground-roll não ocorre um aumento significativo da razão sinal/ruído e os refletores acima de 1s continuam sendo de difícil mapeamento.

A Figura 4.12 mostra o porquê do filtro FK ser um eficiente filtro de eventos inclinados, este além de atenuar o ground-roll, foi capaz de revelar parte das reflexões que antes se encontravam mascaradas pela energia do ruído, aumentando assim a razão sinal/ruído da seção sísmica empilhada. Como a aplicação do filtro FK envolve retirar bandas do sinal no domínio FK, não se observa um aumento significativo da razão sinal/ruído, pois ao se retirar bandas de frequências onde o ruído está confinado parte do sinal também é perdido no processo de filtragem.

O filtro FDR aparece nesse contexto como uma solução engenhosa para esse problema, pois não utiliza-se o conceito de rejeição de bandas do sinal como usava os filtros de frequências 1D e 2D, mas usa operadores de derivadas afim de eliminar os eventos lineares presentes na seção de tiro comum.

A eliminação dos eventos lineares sem alterações significativas na faixa de frequências do sinal aumenta significativamente a razão sinal/ruído na seção e o resultado é uma maior resolução temporal e maior continuidade dos refletores sem muita influência do ruído coerente ground-roll. Após a aplicação do filtro FDR, pode-se notar a presença de refletores acima de 1s com uma maior resolução quando comparada com as seções empilhadas anteriores (Figura 4.13). Vale lembrar que etapas como correção estática e correção DMO não foram realizadas e muito poderia ser ganho a nível de resolução espacial e temporal caso essas etapas fossem aplicadas.

Nota-se uma seção empilhadas com muito baixa frequências (Figura 4.13), visto que o ponto de predição do lado de fora do operador acabou por atenuar também alguns eventos de alta frequências e sendo assim procuramos pensar em um método que pode-se aumentar a resolução temporal da seção. A deconvolução preditiva adaptativa de wiener-Levinson nos permite através da compressão do pulso em um impulso, obter essa alta resolução temporal.

A seção empilhada e deconvolvida após a filtragem FDR apresentaram resultados bastante satisfatórios. Pois o ruído com a coerência temporal, o ground-roll fora atenuada após

o processo de deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson, o que mostra que aliada a filtragem FDR a deconvolução pode fornecer seções empilhadas com um alto grau de resolução temporal. Acima de 1.5 s (Figura 4.14) observa-se um aumento significativo na resolução da seção empilhada, o que é obtida com a combinação do filtro FDR com a deconvolução preditiva adaptativa de Wiener-Levinson.

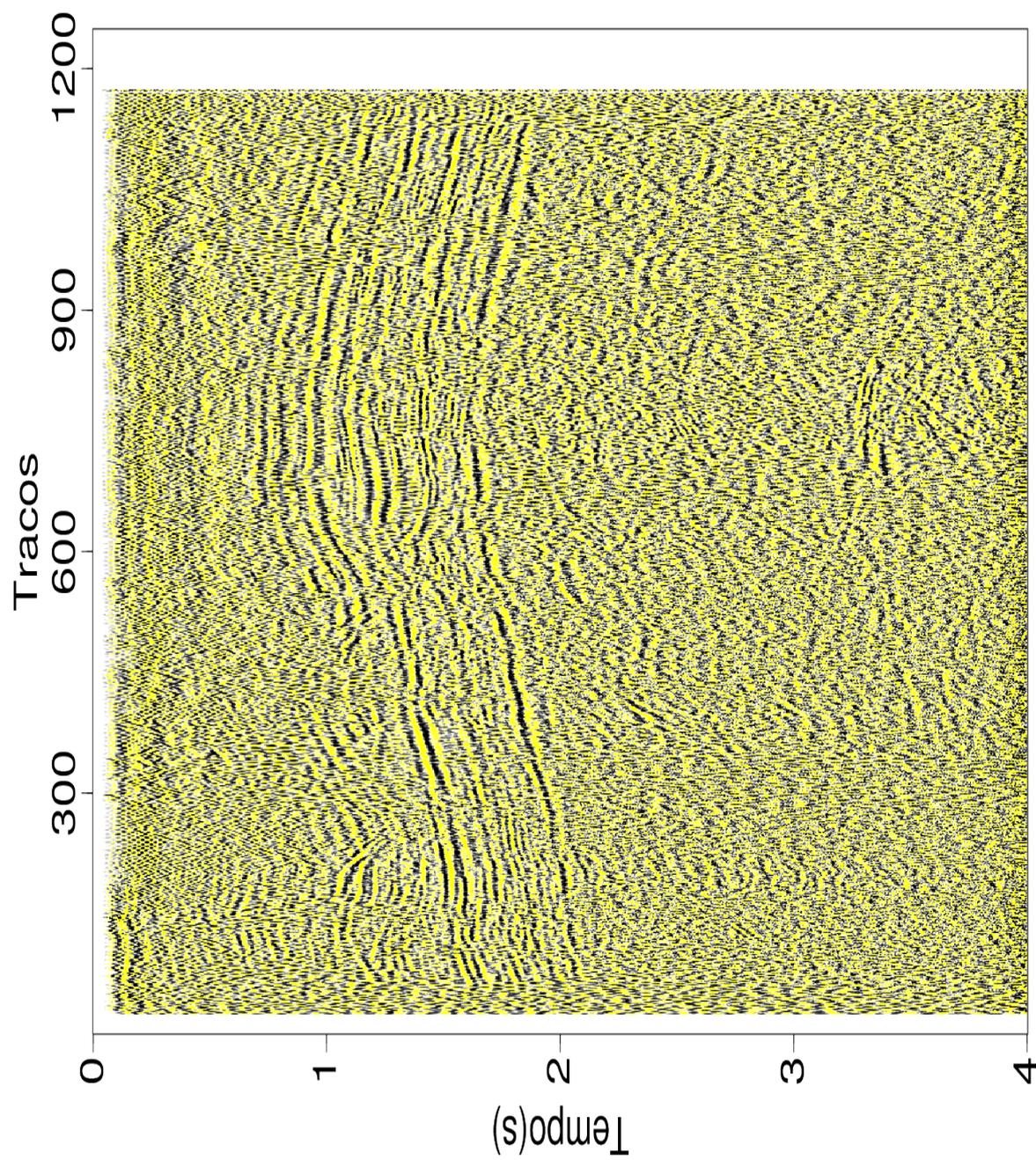


Figura 4.10: Seção original sem aplicação de filtros.

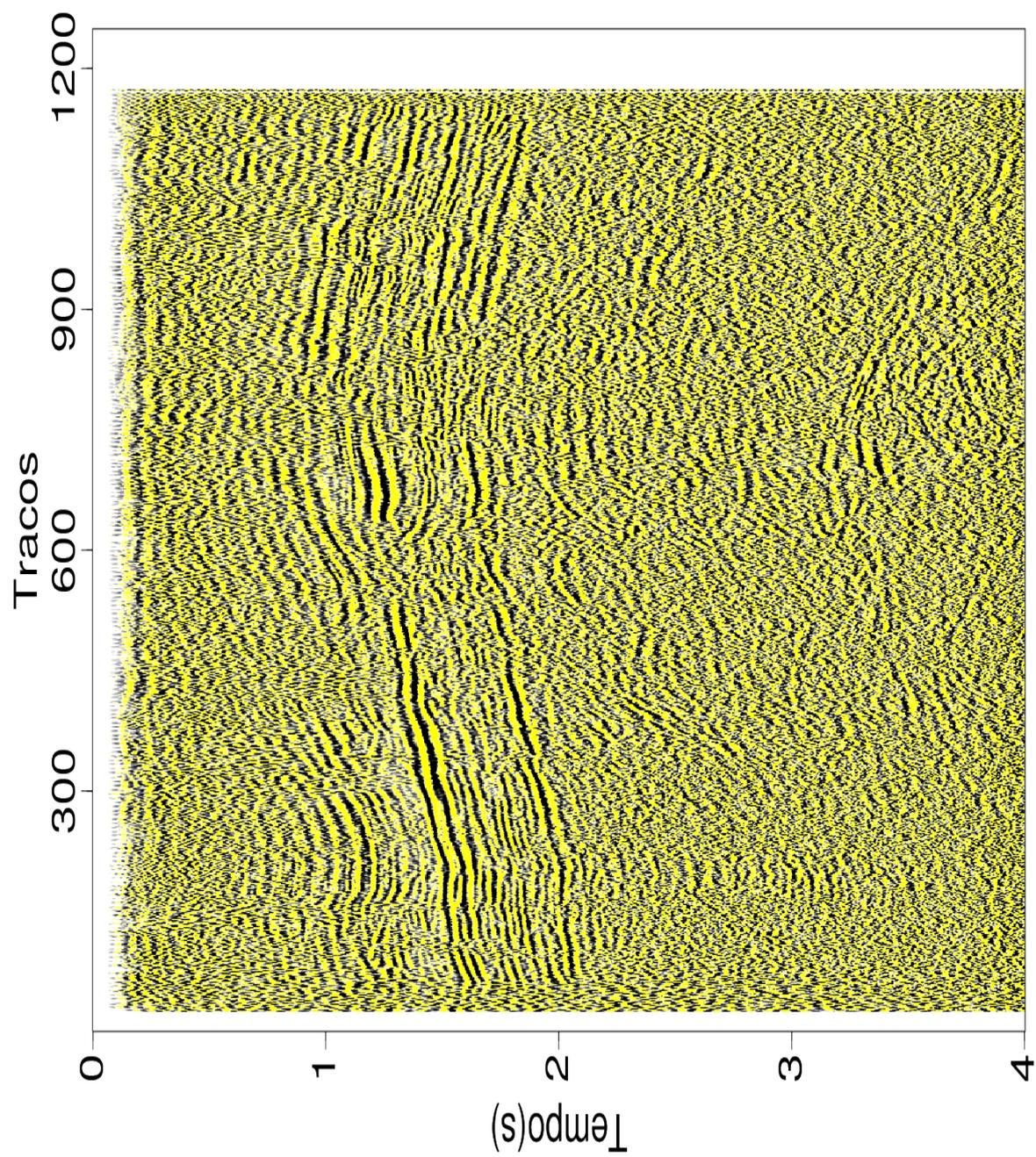


Figura 4.11: Seção após o filtro PB.

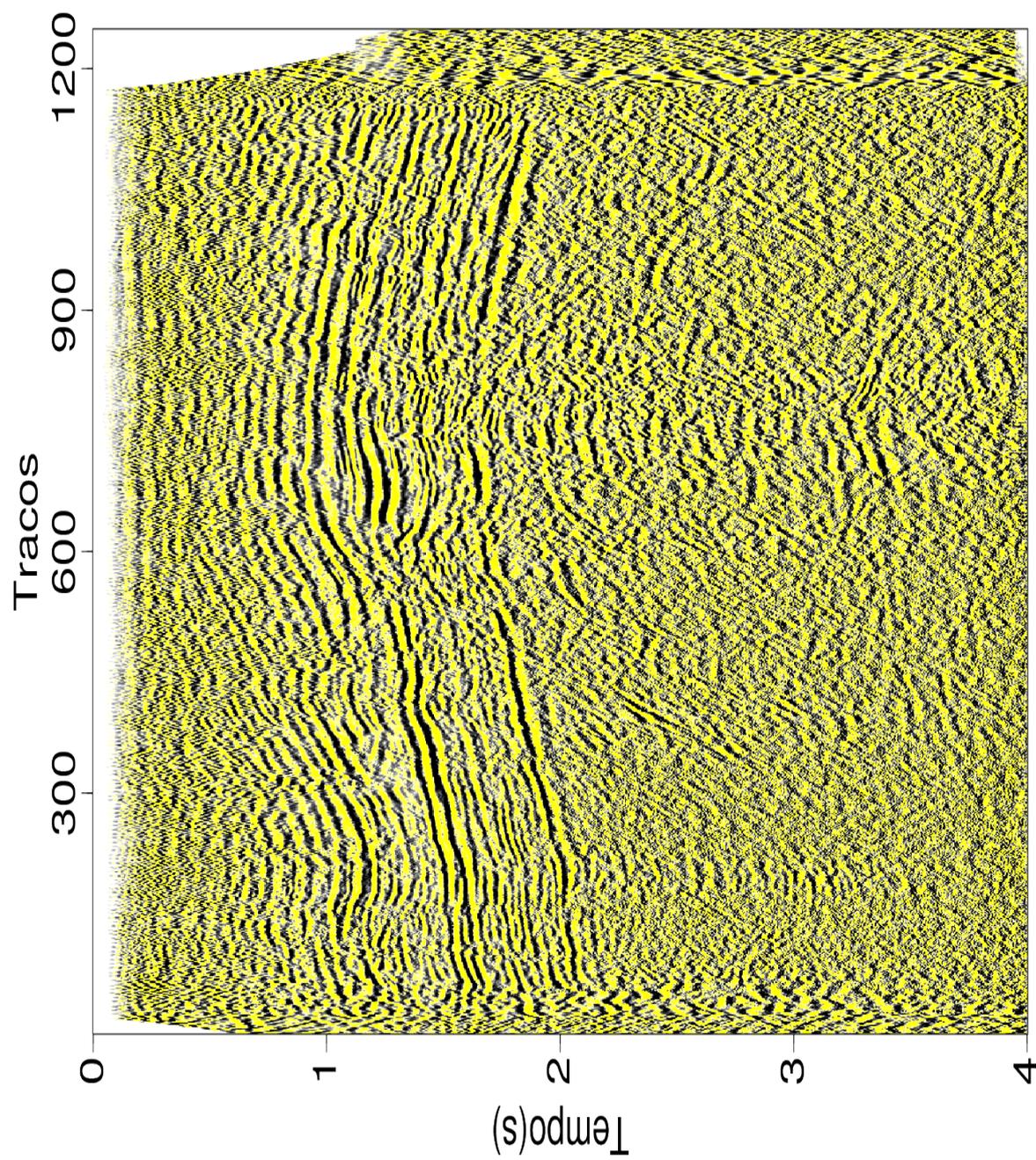


Figura 4.12: Seção após o filtro FK.

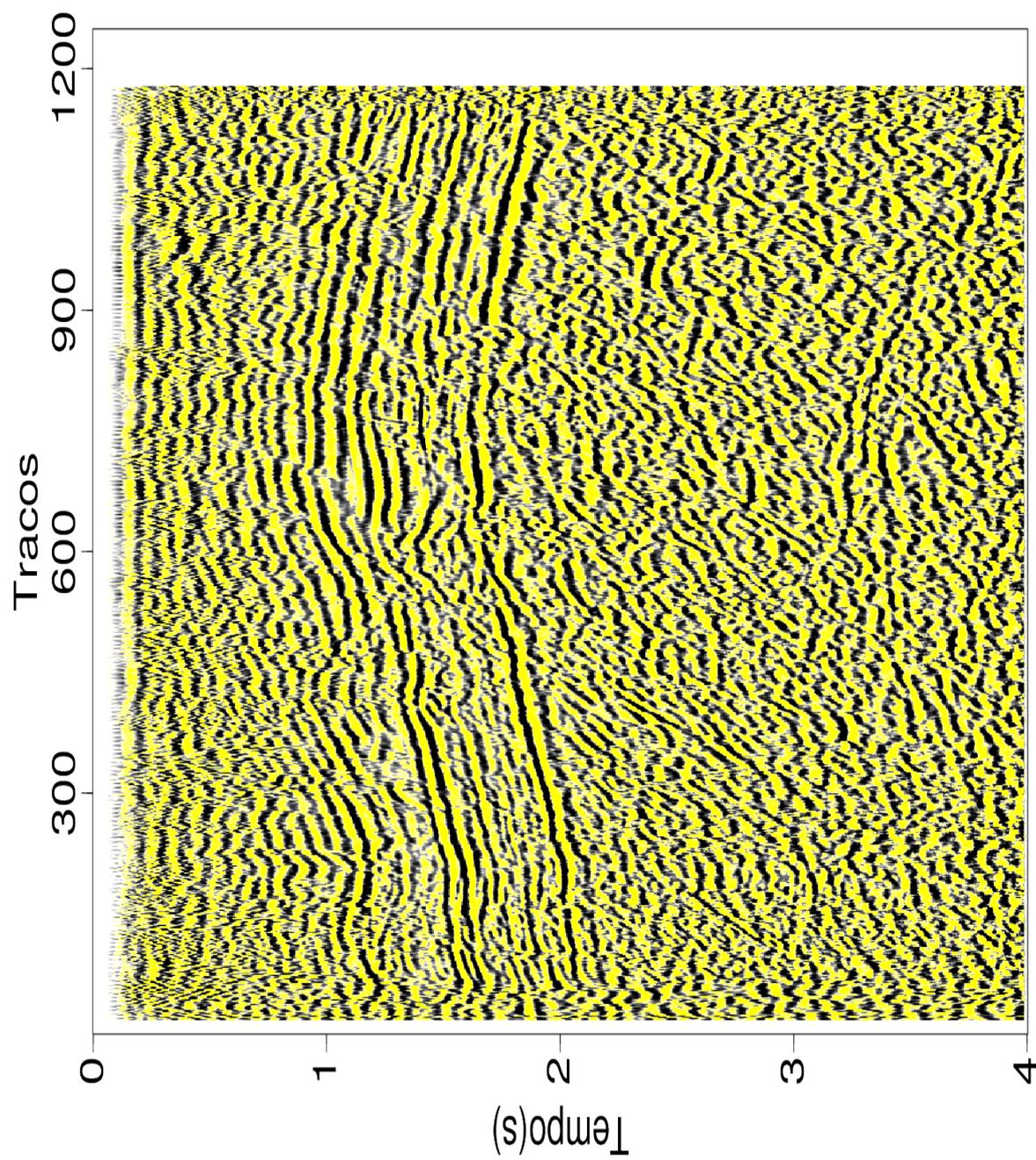


Figura 4.13: Seção após o filtro FDR com ponto de predição fora do operador.

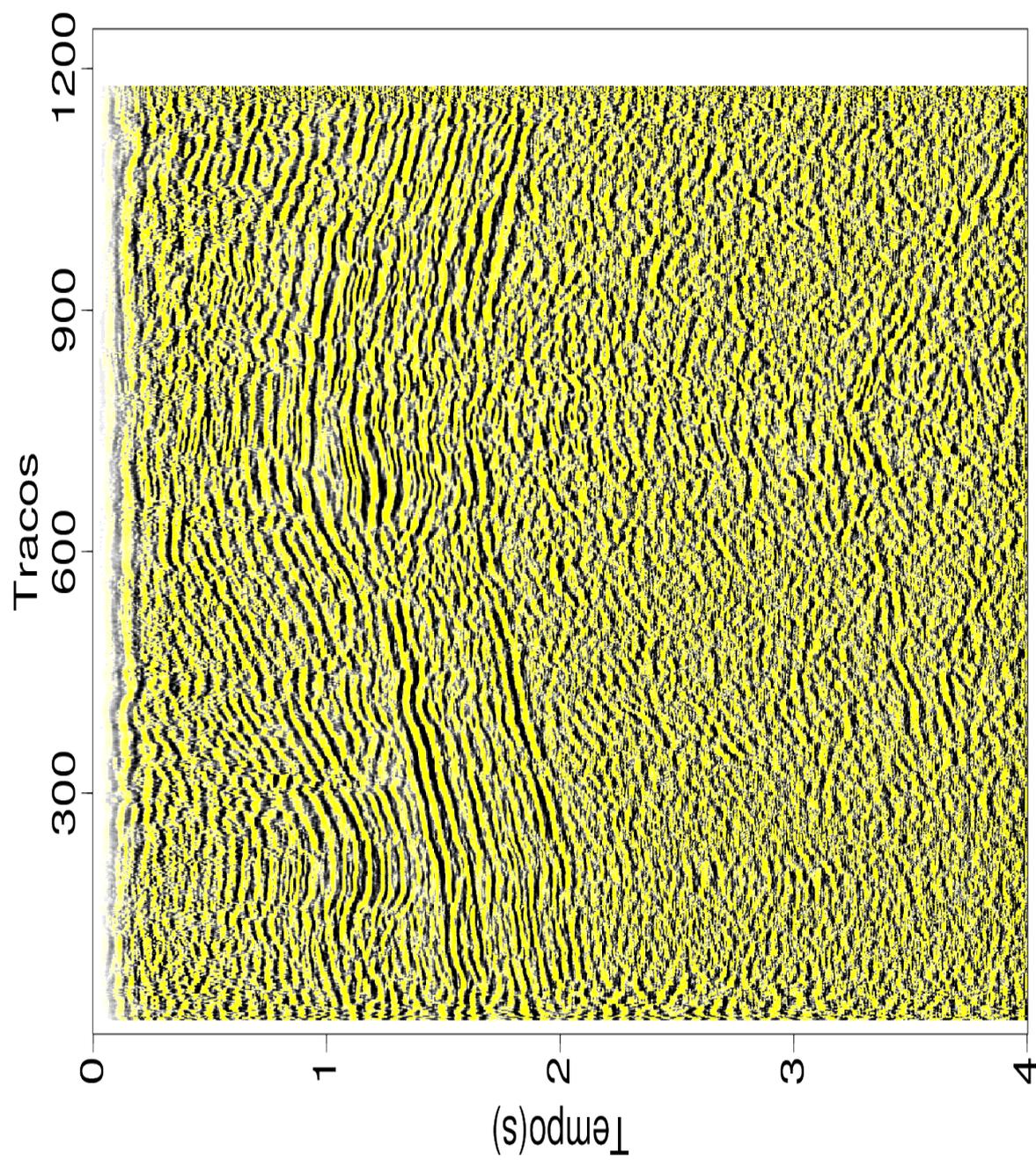


Figura 4.14: Seção com FDR + DAWL com filtro de 7 coeficientes.

## CAPÍTULO 5

### Conclusão

Os métodos convencionais de filtragem como os filtros de frequências PB e FK apesar de serem largamente utilizados para atenuação do ruído coerente *ground-roll* apresentam uma desvantagem quando o assunto é preservar bandas do sinal sísmico, fato que pode acabar reduzindo significativamente a razão sinal ruído no dado.

O método de filtragem desenvolvido no LAGEP-UFBA, o filtro FDR, mostrou ser superior aos métodos convencionais de filtragem, pois ao se evitar zonas de cortes no domínio da frequência e usando a natureza linear do ruído em conjunto com a sua coerência, acaba proporcionando resultados bastantes satisfatórios. Atenuando o ruído de forma bastante eficiente e produzindo seções empilhadas com uma alta razão sinal/ruído.

A relação entre a distância de predição e a atenuação de eventos lineares de altas frequências dentro da filtragem direcional radial precisa ser entendido com mais cuidado, pois essa pode ser uma nova aplicação dos filtros de derivadas, que em sua natureza são filtros corta-baixa.

A aplicação da deconvolução preditiva adaptativa de Wiener-Levinson apesar de considerar amostras zeradas do lado de fora da janela onde o filtro é aplicado, gerou uma seção sísmica empilhada com uma ótima resolução temporal, pois ao usá-la em conjunto com o filtro FDR o resultado é além da compressão do pulso sísmico proporcionado pela deconvolução, a atenuação do ruído coerente. Isso mostra que o *output* do filtro FDR proporciona um leque de aplicações em processo que exigem o menor grau de ruído possível.

O presente trabalho também mostra que é possível gerar seções empilhadas de alta qualidade ao se utilizar a interface GêBr para o processamento sísmico, o que a coloca como uma importante ferramenta na pesquisa de novos algoritmos e no ensino de novos estudantes no universo do processamento de dados sísmicos.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Jeová Deus pois sem Ele, eu não estaria concluindo o presente trabalho. Agradeço a minha família em especial minha avó Dona Carmita, aquela que me criou e sempre acreditou em mim. Agradeço minha esposa Carmen, quem sempre esteve ao meu lado e que apesar das dificuldades nunca desistiu de mim, essa conquista é nossa.

Agradecimentos a turma de graduação de geofísica de 2011, em especial aos membros da salinha: Leandro Nascimento, Peterson Nogueira, Marcelo Santana e Rodrigo Santana. A Michelangelo, que sempre esteve disponível e com quem aprendi muito.

Agradecimento especial ao professor Milton Porsani, por ter paciência, compreensão e por muito me ensinar nesse período de graduação, ensinamentos esses que foram fundamentais para eu me tornar o profissional que sou.

A banca pelas sugestões que enriqueceram este trabalho.

Também agradeço ao cnpq pela bolsa de iniciação científica, como ao INCT-GP pela disponibilização de recursos. Também ao LAGEP-UFBA pela excelente infraestrutura que disponibiliza aos alunos para o nosso crescimento profissional.

E por último e não menos importante a todos os professores do CPGG-UFBA e LAGEP-UFBA que tanto se esforçaram em nos apresentar a verdadeira essência do que é ser um geofísico: Sato, Reynam, Amin, Botelho, Figueiró, Holz, Girão, Susana e todos os nossos professores que durante o período de graduação tanto nos ensinaram.

## Referências Bibliográficas

Almeida, L. J. A. (2013). Atenuação do ground-roll utilizando a transformada wavelet em conjunto com a deconvolução adaptativa. Trabalho de graduação em geofísica, Universidade Federal da Bahia.

Biloti, R.(2013). A plataforma livre de processamento sísmico, GêBR. [www.gebrproject.com](http://www.gebrproject.com).

Cruz, R. F. C. C. (2010). Atenuação da reflexão múltipla do fundo marinho utilizando a deconvolução preditiva adaptativa. Dissertação de mestrado em geofísica, Universidade Federal da Bahia.

Manenti, R.R., Porsani, M.J. (2013). Ground Roll Attenuation Applying Adaptive SVD Method in the Radial Domain, Society of Exploration Geophysicists.

Manenti, R.R.(2013). O uso da transformada radial e filtros SVD e derivada temporal 2D para atenuação do *ground-roll*. Trabalho final de graduação, Universidade Federal da Bahia.

Melo, P.E.M., M.J. Porsani e Silva, M. G. (2008). Ground-roll attenuation using a 2D time-derivative filter. *Geophysical Prospecting*, 2008, 57, 343-353.

Melo, P.E.M. (2007). Novos métodos para filtragem de dados sísmicos de reflexão. Tese de doutorado em geofísica, Universidade Federal da Bahia.

Montenegro, J. F. B. (1996). Deconvolução Adaptativa da assinatura da fonte utilizando janelas de tempo deslizante. Dissertação de mestrado em geofísica, Universidade Federal da Bahia.

Oliveira, V. Q., 2009, Filtragem de eventos lineares nos dados sísmicos utilizando derivada direcional bidimensional. Trabalho final de graduação, Universidade Federal da Bahia.

Santos, A. S., Porsani, M.J. (2013). Derivada direcional radial aplicada a filtragem do *ground-roll*. 3 Workshop da Rede Cooperativa de Pesquisa, Inovação e Transferência de Tecnologia NNE/FINEP de Geofísica de Exploração, Salvador.

Shepard, Donald (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*. pp. 517-524.

Silva, M. G.; Porsani, M. J. (2006) Aplicação de Balanceamento espectral e DMO no processamento sísmico da Bacia do Tacutu. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 24(2),

2006.

Silva, M. G. (2004). Processamento de dados sísmicos da Bacia do Tacutu. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia.

Yilmaz, O. (2001) Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.